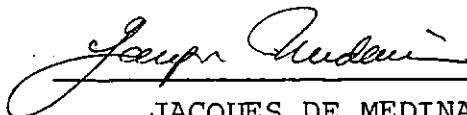


ESTUDO DA PERMEABILIDADE E ESTRUTURA DE SOLO-CAL

- Juçara da Silveira -

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovada por:

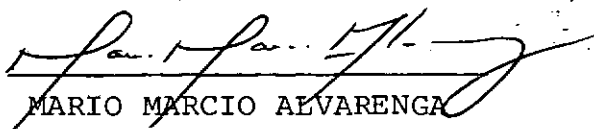


JACQUES DE MEDINA

(orientador)



WILLY ALVARENGA LACERDA



MARIO MARCIO ALVARENGA

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 1979

AGRADECIMENTOS

- Aos professores Jacques de Medina e Mario Marcio Alvarenga, pela orientação deste trabalho.
- Ao professor Willy Alvarenga Lacerda pelas sugestões apresentadas.
- Ao professor Avelino Gonçalves Kock Torres da FEUFJF que me iniciou na Mecânica dos Solos.
- A CAPES, que financiou o trabalho.
- A Goretti, que tanto me incentivou e colaborou para o término deste trabalho.
- A Sandra, pela boa datilografia e a Margareth e Menalca pelos desenhos.
- Aos técnicos do laboratório de Mecânica dos Solos que auxiliaram na execução dos ensaios.
- Aos meus pais e irmãos pela compreensão que tiveram comigo.

SINOPSE

O presente trabalho estuda a variação da permeabilidade e estrutura de um solo quando estabilizado com cal.

Apresenta uma revisão bibliográfica sobre permeabilidade enfocando em princípio os fatores que influenciam na permeabilidade dos solos argilosos. Nesta revisão consta também uma parte sobre solo-cal evidenciando as alterações das propriedades físicas que a cal promove nos solos.

Para a realização dos ensaios de permeabilidade montou-se um permeâmetro a ar comprimido que permite saturação das amostras por contra-pressão. Descreve-se neste trabalho o permeâmetro, sua utilização e sua aplicabilidade nos ensaios de permeabilidade de rotina.

O estudo da permeabilidade foi dividido em três etapas: na primeira ensaiou-se amostras de solo puro, compactadas por amassamento, na segunda ensaiou-se amostras de solo-cal sem cura e na terceira solo-cal com cura, todas com o mesmo tipo de compactação. Os resultados da permeabilidade são apresentados com as correspondentes curvas de compactação.

Os resultados encontrados mostram que há um aumento da permeabilidade do solo quando este é tratado com cal. Este crescimento da permeabilidade é mais marcante em umidades mais altas e a cura pouco influi neste aumento.

Finalizando o trabalho, apresenta-se o estudo da estrutura do solo ensaiado, através do microscópio eletrônico de varredura, comparando-se estrutura do solo puro e solo-cal.

ABSTRACT

A study of changes in permeability and structure of a soil when stabilized with lime is the objective of this thesis.

First, a bibliographic review is made on permeability of clay soils, and the modifications of physical soil properties due to lime treatment.

A special permeameter was built which uses compressed air and permits saturation by back pressure. This apparatus is described and its use in routine work is explained.

The permeability study was divided into three steps: first, the testing of pure soil samples; second, testing of soil-lime with no curing; and third, soil-lime after curing. All samples were compacted by kneading. Permeability and compaction curves are presented.

Results show an increase in soil permeability when the soil is treated with lime. Such an increase is greater for high moisture contents, and curing has little effect on it.

Finally, a study of soil structure was made by using the scanning electronic microscope. Structures of pure soil and soil-lime were compared.

ÍNDICE

Capítulo I	-	INTRODUÇÃO	-----	1
Capítulo II	-	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	-----	3
		2.1. Introdução	-----	3
		2.2. Permeabilidade	-----	3
		2.2.1. Fatores que influenciam a permea-		
		bilidade de solos finos	-----	8
		a- Efeito da composição do solo	-----	9
		b- Efeito do fluido intersticial	-----	10
		c- Efeito do índice de vazios	-----	11
		d- Efeito da estrutura, umidade		
		de moldagem e densidade para		
		amostras de argilas compacta-		
		das	-----	11
		e- Efeito da tixotropia	-----	13
		f- Efeito do método de compacta-		
		ção	-----	14
		g- Efeito do grau de saturação	-----	15
		h- Efeito da variação de gradien-		
		te hidráulico	-----	16
		2.3. Solo-Cal	-----	17
		2.3.1. Reações Solo-Cal	-----	18
		2.3.2. Propriedades físicas dos solos		
		tratados com cal	-----	19
		a- Granulometria e Permeabilida-		
		de	-----	20
		b- Plasticidade	-----	21

	c- Variação de volume	23
	d- Resistência	23
	e- Características de compactação	24
Capítulo III -	EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO E TÉCNICA DE EN-	
	SAIO	26
	3.1. Descrição do Permeâmetro	26
	3.2. Moldagem das amostras	28
	3.3. Procedimento do Ensaio	31
	3.3.1. Saturação	31
	3.3.2. Ensaio	32
	3.3.3. Cálculo	32
	3.4. Análise de Erros	34
Capítulo IV -	CARACTERÍSTICAS DO SOLO UTILIZADO	35
	4.1. Solo Utilizado	35
	4.2. Métodos utilizados nos ensaios de carac-	
	terização	35
	4.3. Análise química	36
	4.4. Dosagem da cal	36
	4.5. Resultados dos ensaios de caracterização	37
	4.6. Discussão	39
Capítulo V -	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE	41
	5.1. Permeabilidade de amostras de solo puro	41
	5.2. Permeabilidade de amostras de solo com	
	3% de cal sem cura após a compactação	47
	5.3. Permeabilidade de amostras de solo com	
	3% de cal e 7 dias de cura após a compac	
	tação	52
	5.4. Variação do gradiente hidráulico	52

Capítulo VI - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA -----	60
6.1. Introdução -----	60
6.2. Preparo da amostra -----	61
6.3. Amostras observadas no microscópio -----	63
6.3.1. Amostras de solo puro -----	63
6.3.2. Amostras de solo com 3% de cal -----	64
6.3.3. Amostras dispersas de cal pura -----	66
6.4. Fotografias -----	67
Capítulo VII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES -----	94
7.1. Conclusões -----	94
7.2. Sugestões -----	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	97

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO


A estabilização de solos com cal é assunto que já foi objeto de muitos estudos ao longo dos anos, sendo largamente utilizada, tanto em termos de estabilização propriamente dito, quanto na forma de simples melhoramento na trabalhabilidade dos solos.

O estudo da permeabilidade de solos também é assunto muito pesquisado e com ampla bibliografia a respeito.

Porém, a permeabilidade de solo-cal ainda não é tema esgotado nem mesmo explorado quer em laboratório quer no campo.

Este trabalho procura mostrar algumas observações que foram feitas em laboratório no estudo de um solo misturado com cal e compactado, visando contribuir de alguma forma para o melhor conhecimento do comportamento de solo-cal quanto à permeabilidade.

O interesse pelo conhecimento da permeabilidade de misturas solo-cal compactadas decorre das aplicações crescentes deste tipo de estabilização, inclusive em estacas de cal como processo de estabilização de terrenos de fundação.

Como o objetivo deste estudo visava a comparação entre os coeficientes de permeabilidade de solo puro  predo-

minantemente argiloso e solo-calç, fez-se necessário montar um permeâmetro com características especiais que possibilitasse maior rendimento nos trabalhos, ou seja, no qual os ensaios de determinação de coeficientes de permeabilidades mesmo muito pequenos, fossem feitos com precisão e maior rapidez.

Optou-se por um modelo de permeâmetro de carga constante, baseado em um aparelho desenvolvido por Mitchell (1965). A carga no permeâmetro é dada por pressão de ar comprimido, que permite o uso de grandes gradientes hidráulicos e o uso de contra pressão para saturação do corpo de prova proporcionando melhor desempenho ao aparelho.

Procurou-se com a observação da estrutura do solo puro e do solo-cal compactados, por meio do microscópio eletrônico, se entender melhor o comportamento dos dois materiais e a variação da permeabilidade com a estrutura.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

A bibliografia existente sobre permeabilidade de solos é muito extensa, a mesma observação podendo ser feita sobre a bibliografia de solos estabilizados com cal. Mas quando se tem necessidade de abordar o efeito que a cal promove na permeabilidade dos solos, não é possível encontrar artigos sobre o assunto nas fontes de consultas disponíveis.

Alguns autores citam as prováveis alterações na permeabilidade de solos estabilizados com cal baseados nas reações químicas que ocorrem entre solo e a cal. Estas observações sobre atuação da cal na permeabilidade variam desde a afirmação de que a "cal pode impermeabilizar um solo compactado" (GUTSCHICK-1958), até de que a "cal pode aumentar muito a permeabilidade em estacas de solo-cal" (BROMS e BOMAN - 1977).

Neste trabalho será apresentado uma revisão bibliográfica sobre permeabilidade e outra sobre estabilização de solo-cal. Sobre permeabilidade dar-se-á ênfase à parte de solos compactados, e em solo-cal às alterações das propriedades físico-químicas dos solos.

2.2. Permeabilidade

A permeabilidade dos solos é uma propriedade de grande importância em determinados projetos de engenharia. Per-

meabilidade vem a ser a maior ou menor facilidade com que a água atravessa os poros do solo.

Em todos os problemas que envolvem o escoamento de água nos solos, tais como, drenagem de estradas e aeroportos, percolação através de barragens de terra, pressões de percolação causando deslizamentos de taludes ou ruptura em muros de contenção, recalques em aterros, e muitos outros, é da maior importância o conhecimento do coeficiente de permeabilidade dos solos em questão.

O fluxo de água tem dois estados característicos em seu movimento: o fluxo laminar em que cada partícula move-se seguindo uma direção definida sem interceptar a trajetória das outras partículas, e o fluxo turbulento cujas trajetórias são indefinidas e podem se cruzar.

Reynolds determinou as leis fundamentais de escoamento de fluidos através de tubos, em ensaios que permitam obter a relação da velocidade de fluxo através de um tubo e a perda de carga por atrito. A figura (1) de TAYLOR (1969) mostra o resultado destes estudos.

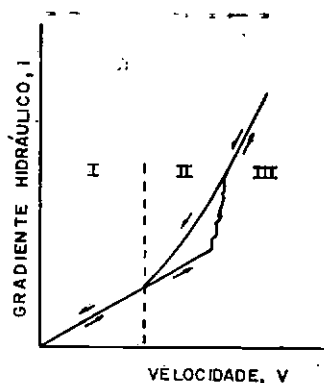


FIG. 1 - Zona de fluxo laminar e turbulento.

A ordenada do diagrama é o gradiente hidráulico i , que é definido como a perda de carga por unidade de distância percorrida. A figura mostra três regiões definidas: a zona I em que as velocidades são pequenas, o gradiente hidráulico é proporcional à velocidade e onde o fluxo é laminar; a zona II onde a velocidade é um pouco maior e já se tem regime turbulento; a zona III em que as velocidades são bem maiores e tem-se uma nova relação entre velocidade e gradiente hidráulico. Se a velocidade inicial do fluxo for alta e gradativamente for decrescendo, chegaremos a um valor menor de velocidade no qual começa a turbulência, e, diminuindo mais ainda a velocidade, chegaremos ao regime laminar. O limite entre as zonas I e II é uma velocidade definida por v_c (velocidade crítica) abaixo da qual teremos sempre fluxo laminar. Reynolds descobriu que v_c é inversamente proporcional ao diâmetro do tubo e propôs a seguinte expressão:

$$v_c = \frac{D\gamma}{\mu g} = RE \quad (2.1)$$

onde:

- D - diâmetro de um tubo circular
- v_c - velocidade crítica
- γ - densidade do fluido
- μ - coeficiente de viscosidade
- g - aceleração da gravidade
- RE - número de Reynolds

Ocorre a turbulência em tubos quando o número de Reynolds excede 2000.

À velocidades menores que v_c , isto é, dentro da zona de fluxo laminar, podemos ver pela figura (1) que a velocidade pode ser escrita por

$$v = ci$$

Nos solos, os poros normalmente são tão pequenos que o fluxo de água será laminar, podendo ocorrer turbulência quando o fluxo de água se faz em solos muito grossos, ou semi-turbulência quando os diâmetros das partículas são maiores que 0,5 mm (CEDERGREN 1967).

Foi Darcy em 1856 quem primeiro demonstrou experimentalmente que a vazão é proporcional ao gradiente, para velocidades de fluxo pequenas, através de ensaios feitos em filtros construídos com areia fina:

$$q = Ki A \quad (2.2)$$

$$\frac{q}{A} = v = Ki \quad (2.3)$$

onde A é a área total da seção transversal de uma massa de solo, através da qual passa a vazão q, e v é a velocidade de descarga ou velocidade superficial pois não se levou em conta a área de vazios através da qual flui o líquido e sim a área total da amostra. O termo K na equação é o coeficiente de permeabilidade de Darcy. Pelas equações 2.2 e 2.3 vemos que o coeficiente de permeabilidade tem a dimensão de velocidade (LT^{-1}) e a unidade comumente usada em ensaios de solos para este coeficiente é cm/s.

O ensaio de permeabilidade consiste em colocar

uma amostra em um molde e submetê-la a uma carga hidráulica conhecida. Medindo-se a quantidade de água que atravessa a amostra num determinado espaço de tempo e entrando com estes valores conhecidos na equação de Darcy tem-se o valor do coeficiente de permeabilidade. Dependendo da forma com que se aplica a carga hidráulica, tem-se dois tipos básicos de permeâmetros: o de carga constante e o de carga variável.

Modelos de permeâmetros de carga constante são mostrados nas figuras 2a e 2b. A amostra de solo é colocada num molde cilíndrico e um contínuo fornecimento de água é dado a amostra. O nível superior de água é mantido constante através de uma alimentação contínua e o escape do excesso. A água que passa pela amostra num determinado tempo t é recolhida e a vazão q é calculada. A área da seção transversal é a área do cilindro, e o gradiente hidráulico i é igual a altura h dividida pelo comprimento da amostra L . Então a permeabilidade K pode ser calculada por:

$$K = Q \frac{L}{h A t} = q \frac{L}{h A} \quad (2.4)$$

O permeâmetro de carga constante é usado para solos de permeabilidade alta, pois que para solos de permeabilidade muito baixa, o tempo necessário para realizar o ensaio é muito grande, tornando-o desaconselhável para este tipo de solo. Para permeabilidades baixas é usado em laboratório o permeâmetro de carga variável.

A figura 2c mostra um modelo de permeâmetro de

carga variável. Para a execução do ensaio a amostra é colocada no cilindro de área A. O tubo livre que está conectado com o cilindro é preenchido com água até o ponto P. Quando o nível de água está no ponto P aciona-se um cronômetro, e mede-se o intervalo de tempo necessário, para a água escoar do ponto P até um outro ponto arbitrado.

Para se calcular a permeabilidade com o permeâmetro de carga variável usa-se a seguinte expressão:

$$K = \frac{2.3 a L}{A \Delta t} \log_{10} \frac{h_0}{h_1} \quad (2.5)$$

onde os elementos estão definidos na figura (2a).

2.2.1 Fatores que influenciam na permeabilidade de solos finos

Fazendo-se analogia do fluxo através dos solos com o fluxo através de tubos capilares chega-se a uma equação teórica que regerá o fluxo através dos solos. A equação é uma ampliação da Equação de Kozeny e Carman e é dada por:

$$K = C \times D_s^2 \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{1 + e} \times S^3 \quad (2.6)$$

onde:

K - coeficiente de permeabilidade

D_s - diâmetro efetivo das partículas

γ - peso específico do fluido

μ - viscosidade do fluido

e - índice de vazios

c - constante que depende da forma das partículas

S - grau de saturação.

Através dos termos da equação (2.6) pode-se avaliar alguns fatores que afetam a permeabilidade dos solos:

- tamanho dos grãos
- características do fluido intersticial
- índice de vazios
- forma e arranjo das partículas
- grau de saturação.

A equação (2.6) tem limitado uso prático para solos finos, pois resultados de ensaios de permeabilidade em argilas mostram-se incoerentes com os calculados pela equação. Esta equação, para ser usada em solos finos, deverá ser melhorada com uma re-interpretação e avaliação de seus termos. Ela nos dá alguns fatores que alteram a permeabilidade de solos finos, mas não é fiel na avaliação de cada fator separadamente na permeabilidade.

a) Efeito da Composição do Solo.

A composição do solo tem efeito marcante na permeabilidade de solos argilosos. LAMBE (1954) através de dados da Universidade de Cornell de 1951, mostra que há variações da permeabilidade conforme o tipo de mineral argílico que compõe o solo. A montmorilonita tem permeabilidade menor que a atapulgita que por sua vez é menor que a caulinita. A variação de permeabilidade também ocorre para um mesmo mineral argílico, dependendo do tipo de ions trocáveis de sua estrutura. Por exemplo, uma montmorilonita sódica tem estrutura defloculada o que

leva a valores menores de permeabilidade do que a montmorilinita cálcica que tem estrutura floculada.

b) Efeito do Fluido Intersticial

O termo $\frac{\gamma}{\mu}$ da equação (2.6) mostra que a permeabilidade depende do fluido intersticial. Estudos sobre permeabilidade de caulinita saturada com diferentes fluidos foram feitos por MICHAELS e LIN (1954) e são mostrados por LAMBE (1954). Os resultados destes estudos mostraram que a permeabilidade da caulinita foi consideravelmente diferente para cada um dos fluidos permeantes.

Normalmente, em laboratório, faz-se o ensaio de permeabilidade com água, e não com outros fluidos. A viscosidade da água é grandemente alterada pela variação de temperatura. O aumento da temperatura causa uma diminuição na viscosidade da água aumentando o valor da permeabilidade. Para corrigir a permeabilidade desta variação de viscosidade, deve-se referir sempre os valores do coeficiente de permeabilidade a uma temperatura padrão (20°C). A correção feita no ensaio é a seguinte:

$$K_{20} = K_T \times \frac{\mu_T}{\mu_{20}}$$

onde:

K_{20} - coeficiente de permeabilidade a 20°C

K_T - coeficiente de permeabilidade à temperatura do ensaio

μ_{20} - viscosidade da água à 20°C

μ_T - viscosidade da água à temperatura do ensaio.

c) Efeito do Índice de Vazios

A variação que o índice de vazios causa na permeabilidade de solos finos não é a que nos mostra a equação (2.6). Enquanto que para as areias, plotando-se K versus $\frac{e^3}{1+e}$, encontra-se uma linha reta, tal não acontece para as argilas, pois ensaios de laboratório mostram que a melhor relação da permeabilidade com índice de vazios é $\log K$ contra e . Obtem-se esta relação variando-se apenas o índice de vazios. Segundo LAMBE (1954), a permeabilidade das argilas depende não somente do valor do índice de vazios, mas principalmente, do modo pelo qual se atinge esse valor, o que vai determinar o tipo de estrutura do solo, que é o fator preponderante na permeabilidade de argilas.

d) Efeito da Estrutura, Umidade de Moldagem e
Densidade para Amostras de Argilas Compactadas

Lambe estudou os efeitos da estrutura, umidade de moldagem e densidade na permeabilidade de solos argilosos. A figura 3 mostra resultados obtidos por LAMBE (1954) em uma argila arenosa compactada por amassamento, onde a umidade de moldagem e estrutura tiveram maior efeito na permeabilidade do que a densidade. Baseado nos estudos de LAMBE, MITCHELL e outros (1965) estudaram a permeabilidade de argilas siltosas compactadas. Para avaliar somente o efeito da estrutura na permeabilidade Mitchell ensaiou amostras que tinham umidades de moldagem diferentes mas densidades iguais, preparadas por compactação do tipo amassamento. Estes resultados são mostrados na figura 4 e vê-se que há um ligeiro aumento da permeabilidade com o aumento do teor de umidade. Perto da umidade ótima ocorre uma busca diminuição da permeabilidade e as amostras preparadas no ramo úmido tem permeabi

lidades bem menores que as preparadas no ramo seco.

Estas amostras de argila siltosa haviãm sido anteriormente estudadas por SEED e CHAN (1959), evidenciando ter este solo estrutura extremamente sensível ao método de compactação. A compactação feita por Mitchell, foi do tipo amassamento, o que conduz a uma estrutura dispersa no ramo úmido devido às grandes deformações cisalhantes.

O comportamento da permeabilidade para amostras compactadas abaixo da umidade ótima é incerto. Nas figuras 5 e 6 veem-se dois solos diferentes ensaiadas por Mitchell em que os comportamentos abaixo da umidade ótima são diferenciados. A figura 6 está em concordância com os valores obtidos por Lambe (fig. 3); com o aumento da umidade de moldagem há um decréscimo na permeabilidade. Já na figura 5 o comportamento não é o mesmo, A permeabilidade passa por um valor mínimo a umidade baixa, crece até um máximo, na umidade de 12,5%, decrescendo logo após, devido à dispersão da estrutura.

Segundo Mitchell este comportamento no ramo seco, em que permeabilidade pode crescer ou decrescer, é função de uma complexa interação entre o tipo de solo, a energia de compactação, variações pequenas na estrutura com o aumento da umidade de moldagem, efeitos de uma saturação não uniforme e possível migração de finos ocorrida durante a permeação.

Mitchell estudou as interrelações entre permeabilidade, estrutura, umidade de moldagem e densidade em três séries de amostras compactadas com três energias diferentes. Os

resultados destes estudos estão representados nas figuras 7 e 8. A figura 7 mostra que a permeabilidade é função da umidade de moldagem para amostras compactadas com energias menores (curvas A e B) e que são similares às curvas da figura 4. A curva C, de maior energia, tem comportamento similar às curvas das figuras 3 e 6. A figura 8 mostra dados transportados da figura 7 para evidenciar a variação da permeabilidade com peso específico aparente seco, para diversas umidades de moldagem constantes. A figura 8 mostra que, para uma mesma umidade, com o aumento do peso específico aparente seco há um decréscimo na permeabilidade. Mas a importância destes resultados está na grande variação de permeabilidade com pequenas variações da umidade e peso específico seco. Nas umidades de 18%, 19% e 20% mostradas na figura 8 a permeabilidade decresce de 100 a 1000 vezes com variação muito pequena da umidade e peso específico aparente seco, mas somente há um aumento na energia de amassamento. O crescimento da energia só atua na maior dispersão das partículas o que reduz o diâmetro dos canais de fluxo, diminuindo, desta forma, a permeabilidade.

e) Efeito da tixotropia

MITCHELL e outros (1965) estudaram o efeito da tixotropia na permeabilidade de solos compactados. A tixotropia é o ganho de resistência com o tempo após a compactação da argila sem que haja variações na umidade e densidade. Com o tempo, a estrutura de uma argila compactada torna-se mais floculada, e há também um decréscimo na pressão da água dos poros. Estes dois efeitos causam aumento na resistência do solo e no coeficiente de permeabilidade, pois a estrutura mais floculada le-

va a tamanhos de poros maiores que influem predonderantemente no valor da permeabilidade, comparados aos poros de menor dimensão também existentes.

Os valores encontrados por Mitchell mostram que a permeabilidade aumenta com a idade das amostras compactadas, e este efeito é mais marcante com o crescimento da unidade de moldagem.

f) Efeito do Método de Compactação

Os estudos de SEED e CHAN (1959) mostram os efeitos do método de compactação na expansão, contração e características de deformação de argilas compactadas. A deformação cisalhante e o grau de dispersão crescem dependendo dos tipos de compactação na seguinte ordem: estático, vibração e amassamento. Estes efeitos são notados no ramo úmido da curva de compactação onde é possível formar-se estrutura dispersa sob ação da deformação cisalhante.

As amostras compactadas por amassamento têm permeabilidades mais baixas que amostras preparadas por compactalão estática, segundo resultados de MITCHELL (1965) mostrados na figura 9. Para as amostras preparadas no ramo seco o método de compactação tem pequeno efeito na permeabilidade porque não induz muita dispersão abaixo da unidade ótima. A figura 9 mostra que a permeabilidade de amostras compactadas estaticamente diminui muito acima da unidade ótima. Este comportamento não pode ser explicado pela dispersão da estrutura pois a compactação tipo estático produz menos deformações cisalhantes localizadas.

OLSEN (1960) justifica o comportamento da permeabilidade de argilas sob o conceito de "clusters", que é a explicação mais indicada para o caso da compactação estática. Segundo Olsen as partículas de argila floculam em agregados ou "clusters", sendo que a resistência destes diminui com o aumento da umidade. O fluxo num solo com estrutura em "cluster" é controlado mais pelo fluxo inter-"clusters" do que pelo fluxo através dos "clusters". Se a umidade é baixa, os "clusters" opõem resistência à compactação estática e não ocorrem grandes distorções na estrutura. Se a umidade é alta, os "clusters" ficam mais fracos e são mais facilmente distorcidos pela compactação estática. Esta distorção dos "clusters" leva a uma diminuição dos espaços inter-"clusters" diminuindo a permeabilidade mas estando a estrutura ainda floculada, quando a compactação é estática. A compactação tipo amassamento com umidades acima da ótima leva a uma total distorção dos "clusters" diminuindo sensivelmente os tamanhos dos poros e levando a permeabilidades menores que os valores encontrados para amostras compactadas estaticamente.

g) Efeito do Grau de Saturação

Pela equação (2.6) de KOZENY-CARMAN vemos que a permeabilidade é proporcional ao cubo do grau de saturação. Esta conclusão é aproximada pois o fluxo através dos solos finos não é igual ao fluxo através de tubos capilares como propõe a equação.

MITCHELL e outros (1965) ensaiaram amostras com diversos graus de saturação entre 80 e 100%, e concluíram que a permeabilidade varia com o cubo do grau de saturação mas

que correlações igualmente boas foram determinadas diretamente com o grau de saturação. Para argilas compactadas a permeabilidade é muito sensível à variação do grau de saturação e esta pode aumentar de 4 a 5 vezes o valor do coeficiente de permeabilidade.

h) Efeito da Variação do Gradiente Hidráulico

A permeabilidade é sensível aos gradientes hidráulicos usados em sua determinação para determinados níveis de gradientes. HOOPER (1960) estudou o comportamento de uma argila siltosa compactada numa umidade acima da ótima e usando contra-pressão para a saturação.

Na figura 10 vemos os resultados de Hooper retirados de MITCHELL e YOUNGER (1967), onde os gradientes usados nos ensaios foram altos. A variação de gradientes de 100 a 600 não foi suficiente para alterar sensivelmente a permeabilidade. Vemos pelo gráfico velocidade de descarga versus gradiente hidráulico que não há um desvio considerável da lei de Darcy.

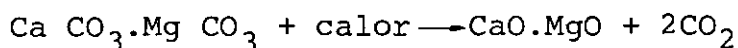
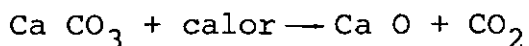
Para investigar uma possível variação na lei de Darcy, Hooper ensaiou amostras de argila siltosa compactadas com gradientes variando de 0 a 16. Estes resultados são mostrados nas figuras 11 e 12. A figura 11 mostra a relação entre o coeficiente de permeabilidade e o gradiente hidráulico, mostrando visto claramente que o fluxo não está de acordo com a lei de Darcy. A figura 12 mostra a variação da velocidade de descarga com o gradiente hidráulico para os mesmos ensaios. Este gráfico indica a existência de um gradiente limite a partir do qual, o fluxo observado está em acordo com a lei de Darcy. Este resulta

do pode ser interpretado pela migração de partículas e efeitos do bloqueio dos poros ou pelas propriedades anormais da água, segundo MITCHELL e YOUNGER (1967).

2.3. Solo-Cal

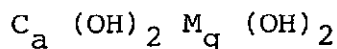
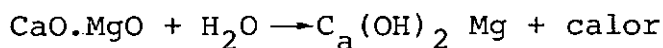
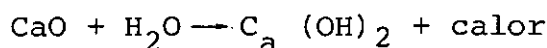
A estabilização de solos argilosos com cal é usada principalmente na construção de estradas obtendo-se bons resultados. Pequenas quantidades de cal adicionadas ao solo, promovem uma melhor trabalhabilidade do mesmo, diminuindo sua plasticidade e variações do volume. Se as percentagens de cal adicionadas ao solo forem maiores tem-se ainda um acréscimo na resistência e na capacidade de carga do solo.

A cal é obtida pela calcinação dos calcários ou dolomitos através de decomposição térmica. As reações são esquematizadas abaixo, para os principais tipos de cal usadas na estabilização de solos.



CaO, cal calcítica viva

CaO.MgO, cal dolomítica viva



Ca(OH)₂ cal calcítica hidratada

Ca(OH)₂Mg cal dolomítica mono-hidratada

Ca(OH)₂Mg(OH)₂ cal dolomítica di-hidratada

A cal quando adicionada ao solo promove alterações nas características físicas deste, devido as reações químicas que nele ocorrem, conforme se comenta a seguir.

2.3.1 Reações Solo-Cal

Quando se adiciona cal a um solo ocorrem diversas reações, umas imediatamente após a mistura e outras ao longo do tempo.

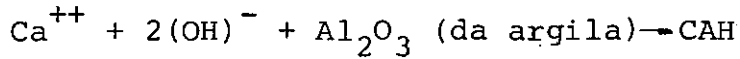
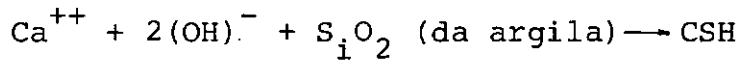
A floculação e a troca catiônica segundo HERRIN e MITCHELL (1961) ocorrem rapidamente quando o solo e cal são intimamente misturados. A troca catiônica é uma troca dos cátions Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} existentes na superfície das partículas de argila pelo Ca^{++} da cal. A floculação resulta da aglomeração dos cátions adicionais de cálcio na superfície das partículas de argilas. O efeito dessas duas reações pode ser observado até visualmente, pois a argila torna-se mais friável com aspecto de silte.

As reações que se processam lentamente são as que produzem ação cimentante da cal.

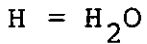
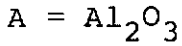
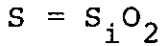
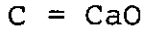
A reação pozolânica é a principal produtora da cimentação. As reações pozolânicas ocorrem com materiais que contêm sílica e alumina e que estando finamente divididos, em presença de água, reagem com a cal.

Os minerais argílicos tem propriedades pozolânicas, e, reagindo com a cal, produzem um gel de silicato de cálcio hidratado e/ou aluminato de cálcio hidratado que provocam a cimentação das partículas.

Estas reações são esquematizadas a seguir:



onde:



As reações pozolânicas de solo-cal são influenciadas pelas propriedades naturais do solo. Segundo HARTY e THOMPSON (1973) deve-se considerar os seguintes fatores que influenciam as reações pozolânicas de solo-cal: tipo e quantidade da cal, condições de cura, densidade, e as propriedades naturais do solo (quantidade de carbono orgânico existente, quantidade de sílica e alumina e óxido de ferro, sulfatos e carbonatos livres, mineralogia da argila).

A carbonatação é a reação da cal com o dióxido de carbono existente no ar. O dióxido de carbono (CO_2) reage com o hidróxido de cálcio da cal e forma o carbonato de cálcio (CaCO_3). Estes carbonatos são cimentos fracos e também detêm as reações pozolânicas.

2.3.2 Propriedades físicas dos solos tratados com cal

As propriedades físicas de um solo são afetadas pelas reações químicas que ocorrem quando se lhe adiciona cal.

Em geral os solos finos apresentam melhoria na plasticidade, trabalhabilidade e na variação de volume, quando são

tratados com cal, mas nem todos os solos apresentam melhora na resistência e durabilidade. O tipo de solo, o tipo da cal e a percentagem usada, o tempo e temperatura de cura, são algumas variáveis importantes que influem no comportamento dos solos tratados com cal.

Serão sumarizadas algumas alterações das propriedades físicas do solo, a seguir.

a) Granulometria e Permeabilidade

A primeira variação física que a cal provoca nos solos finos é a floculação e aglomeração das partículas de argila, produzindo um solo mais grosseiro, mais friável e permeável.

Resultados encontrados por LUND e RAMSEY (1959) mostram que uma argila com 10% de cal após 240 dias de cura pode ser classificada como areia. CASTRO E. (1969) mostra que um solo tratado com 5% de cal pode sofrer variações tão grandes de granulometria, que a porcentagem que passa na peneira 200 se reduz de 99% para 14%.

Os aglomerados formados com a adição da cal nas argilas podem se desfazer quando embebidos em água, porém alguns deles podem se tornar hidrofóbicos e manter a agregação após longos períodos de molhagem.

INGLES (1972) diz que as baixas permeabilidades de solos argilosos podem ser aumentados através da adição de floculantes, sendo o mais usado para solos a cal.

ESMER e outros (1969) através de alguns resultados de ensaios de permeabilidade de solos tratados com cal, concluem que a cal aumenta a permeabilidade dos solos.

BROMS e BOMAN (1977) estudando estacas de solo-cal indicam que ensaios de permeabilidade realizados nestas estacas mostram um crescimento na permeabilidade de 100 a 1000 vezes, tendo estas estacas a função de drenos verticais no solo.

GUTSCHICK (1958) contraria os outros pesquisadores dizendo que a cal torna os solos compactados praticamente impermeáveis, e que as argilas tratadas com cal absorvem água só até o seu teor ótimo de umidade.

b) Plasticidade

A cal provoca uma substancial redução na plasticidade de argilas quimicamente reativas.

Segundo HERRIN e MITCHELL (1961), para os solos muito expansivos e de alta plasticidade, a cal diminui o limite de liquidez e aumenta o limite de plasticidade, resultando em um decréscimo no valor do índice de plasticidade. LUND e RAMSEY (1959) apresentam resultados de um solo com limite de liquidez de 51% e limite de plasticidade de 30%, que passa a ter comportamento não plástico com a adição de 6% de cal e 2 dias de cura.

Solos de baixa plasticidade e pouco expansivos apresentam um aumento no limite de liquidez e também acrêscimos no limite de plasticidade quando são misturados com a cal. BRAND

e SCHOENBERG (1959) mostram resultados da modificação da plasticidade de um solo com a adição de 5% de cal, onde o limite de liquidez aumenta de 22,8 para 24% e o limite de plasticidade passa de 18% para 22%, dando uma redução no índice de plasticidade de 4,8% para 2%.

O aumento da quantidade de cal usada tende a diminuir mais o índice de plasticidade, assim como o aumento do tempo de cura, na maioria dos solos.

Resultados de ARMAN e MUNFAKH (1972) com solos orgânicos, mostram que o índice de plasticidade decresce até uma porcentagem crítica (4% de cal) e, a partir desta, aumenta com o aumento da quantidade de cal. A explicação dada por estes autores é que 4% de cal constitui uma quantidade que satisfaz as reações químicas do solo com a cal e que o excesso de cal atua como lubrificante aumentando a plasticidade.

MENENDES GARCIA (1973), apresentou resultados de solos altamente expansivos, em que o limite de liquidez e o limite de plasticidade decresceram, com maior decréscimo no limite de liquidez, ainda resultando numa redução no índice de plasticidade.

As alterações causadas pela cal nos limites são percebidos logo após algumas horas de cura, porém a completa alteração destes só ocorre após 3 dias de cura.

c) Variação de Volume

A expansão e a pressão de expansão de um solo são normalmente reduzidas quando este solo é tratado com cal. A diminuição da expansão é atribuída à formação de uma matriz cimentante que resiste a expansão volumétrica.

O limite de contração volumétrica aumenta, isto é, a umidade em que o solo não se contrai mais cresce, enquanto o valor da contração linear diminui com a adição de cal ao solo.

CASTRO (1969) conclui em seu trabalho que solos com expansibilidade menor que 10% não são grandemente alterados pela adição de cal; os solos que apresentam maiores expansões são os que sofrem maiores reduções de expansão.

d) Resistência

Diversos ensaios são utilizados para avaliar a resistência de solos estabilizados com cal. Os ensaios de resistência à compressão simples e o CBR são os mais usados. A resistência do solo normalmente aumenta com a adição de cal.

Diversos fatores afetam a resistência de solos tratados com cal, entre eles o teor de cal, o tipo da cal, a natureza do solo e o tempo de cura.

Dados de EADES e GRIM (1960) mostram a variação de resistência à compressão simples para diversos tipos de solo. Para a caulinita houve um grande aumento de resistência para baixos teores de cal, para a montmorilonita e illita os pri-

meiros teores de cal diminuíram a resistência e só após 4% de cal esta começou a crescer..

A cal viva é mais eficaz para estabilizar solos do que as cales hidratadas, tanto a calcítica quanto a dolomítica, havendo diferentes resultados entre estas, também.

Segundo HERRIN e MITCHELL (1961) a resistência de solos estabilizados com cal cresce com o tempo de cura. Normalmente há um rápido crescimento na resistência no início do tempo de cura, e ocorre uma diminuição deste crescimento com o aumento do tempo de cura.

Resultados obtidos por JAN e WALKER (1963) mostram que o CBR pode crescer de 13,3% para 131,7% com adição de 5% de cal em amostras submetidas à cura úmida de 4 dias e embebição. Para amostras não curadas, com a realização do ensaio após a moldagem, o valor do CBR variou de 75,7% para 81,7% com 5% de cal. O aumento do conteúdo de cal no solo faz crescer o valor do CBR após a moldagem, mas esta variação é mais pronunciada quando as amostras são submetidas a cura úmida e embebição antes da realização do ensaio.

e) Características de Compactação

Quando compactados com o mesmo esforço, a amostra de solo-cal tem densidade mais baixa que a amostra de solo puro. Se a quantidade de cal da mistura cresce, a densidade decresce mais.

A umidade ótima cresce com a adição de cal ao solo, e, também, cresce com o aumento da percentagem de cal usada na mistura.

Dados de LUND e RANSEY (1959) mostram esta tendência. Amostras de solo puro com 19% de umidade ótima e $1,67 \text{ g/cm}^3$ de densidade máxima atingem o valor de 21% e $1,62 \text{ g/cm}^3$ quando são adicionados 3% de cal e 22% e $1,54 \text{ g/cm}^3$ para 10% de cal, respectivamente.

CAPÍTULO III

EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO E TÉCNICA DE ENSAIO

3.1 Descrição do Permeâmetro

Para o desenvolvimento deste trabalho houve necessidade de fazer a montagem de um permeâmetro capaz de realizar ensaios em menos tempo do que permitem os permeâmetros convencionais. Baseados no trabalho de Mitchell e outros (1965), montou-se um permeâmetro de carga constante que permite a saturação da amostra por contra-pressão. O aparelho é mostrado esquematicamente na figura 13. A pressão de ar é aplicada nos reservatórios de água (2) através de válvulas reguladoras de pressão (1); destes reservatórios saem dois tubos de nylon de diferentes diâmetros (3) e (4) que estão conectados à entrada e à saída da célula do permeâmetro através das válvulas (7), (8) e (9). A válvula (7) está ligada ao tubo de nylon de menor diâmetro e é usada para solos de permeabilidade mais baixa, e a válvula (8) ao tubo de maior diâmetro para permeabilidades mais altas. A válvula (9) comanda a entrada do fluxo de água na célula do permeâmetro. A pressão aplicada nos reservatórios de água é medida através de um manômetro (10) situado no centro do painel. Através das válvulas (11) ligadas ao manômetro pode-se medir as pressões do lado esquerdo ou direito do sistema. Foi utilizado tetracloreto de carbono (C Cl_4) com corante na parte inferior dos tubos U para definir uma interface com a água. Os tubos U foram calibrados e a observação da variação do curso da interface através das escalas (5) dá-nos diretamente a medida da velocidade do fluxo de água. O reservatório de água (6)

permite o recarregamento dos tubos U quando termina um ciclo, isto é, quando toda a água existente no tubo já atravessou a amostra.

A célula do permeâmetro mostrada na figura 14 possui um molde cilíndrico de acrílico de 6,3 cm de diâmetro interno e 1,35 cm de espessura da parede e 2,5 cm de altura. Contem na base e no topo pratos de latão onde se ajustam as pedras porosas.

3.2 Moldagem das Amostras

A medida da permeabilidade do solo foi obtida em amostras compactadas no próprio molde de acrílico da figura 14. A compactação foi do tipo amassamento, sendo necessário a adaptação de uma sapata no soquete de aplicação da energia para aumentar sua área de contato, ficando desta forma a relação de área entre soquete e diâmetro do molde igual à do ensaio Harvard miniatura.

Todas as amostras foram compactadas em 5 camadas por amassamento. Para solo puro o número de aplicações por camada foi de 15, 25 e 35 e para solo-cal de 25, 35 e 45 aplicações. A força exercida pelo soquete em cada aplicação foi de 17 kgf.

O solo foi homogeneizado no dia anterior ao da realização do ensaio e colocado em câmara úmida dentro de sacos plásticos. No dia seguinte procedia-se à compactação e logo a seguir realizava-se o ensaio de permeabilidade. A compactação foi realizada desta forma para as curvas de compactação do solo puro e do solo-cal sem cura. Nas amostras de solo-cal curadas o procedimento era análogo, sendo que logo após a compactação o molde envolto em papel alumínio foi levado à câmara úmida onde permanecia 7 dias para depois ser realizado o ensaio de permeabilidade.

As paredes do molde de acrílico foram bem lubrificadas antes da compactação, para não haver caminho preferencial de fluxo entre a parede e o solo durante a realização do ensaio

de permeabilidade.

Durante a compactação nos moldes tomou-se o cuidado de colocar o mesmo peso de solo em cada camada; mesmo assim houve dispersão nos valores do peso específico aparente seco para um mesmo número de golpes por camada e igual umidade. Uma pequena variação na umidade conduzia a uma apreciável variação no peso específico aparente seco, por causa da pequena quantidade de solo necessária para preencher o molde de acrílico (de 140 gramas a 160 gramas). Para se obter um valor confiável da umidade, esta foi determinada através de diversas pesagens feitas ao longo de 2 a 3 dias, até haver realmente constância de peso. Notou-se com este procedimento que a variação de umidade de uma cápsula na estufa é grande, em face do ganho de umidade que ocorre quando outras cápsulas são colocadas na estufa, porque não existe circulação de ar na estufa. Todas as determinações de umidade passaram a ser feitas pela manhã por se saber que durante a noite não havia ganho de umidade pois novas cápsulas não eram colocadas na estufa.

Mesmo com todos os cuidados na compactação, para se obter uma curva de compactação de 5 pontos foi necessário moldar, em média, o dobro do número de pontos no molde de acrílico.

Alguns moldes com solo tratado com cal e sujeitos a 7 dias de cura em câmara úmida sofreram retração e consequentemente descolamento do molde de acrílico impedindo desta forma a realização do ensaio de permeabilidade nestas amostras. Esta retração ocorreu nos pontos do ramo úmido da curva de compacta

ção e percebeu-se que houve perda de umidade junto com a retração. O problema foi resolvido colocando-se os moldes de acrílico envoltos em papel alumínio e sacos plásticos imersos na água dentro de cubas até o final da cura. Com este procedimento não havia perda de umidade e conseqüentemente não ocorria a retração.

3.3 Procedimento do Ensaio

3.3.1 Saturação

A saturação da amostra é feita por contra pressão, começando-se com valores baixos de pressão e aplicando-se incrementos com o tempo.

Depois de ajustado o molde de acrílico na célula do permeâmetro e conectado os tubos de ligação com o painel, pode-se começar a saturação, tomando-se o cuidado para não haver entrada de bolhas de ar. A pressão é aplicada nos dois reservatórios de água (2) através das válvulas reguladoras de pressaõ (1); neste estágio as válvulas (7) ou (8) estarão abertas e a (9) fechada. Após a aplicação da pressão as válvulas (9) são abertas simultaneamente. Para se fazer o incremento de pressaõ as válvulas (9) devem ser fechadas, e abertas, novamente, após o acréscimo de pressão.

O nível de pressão de saturação utilizado foi de, no máximo, 4 kg/cm^2 , limite este delimitado pela disponibilidade de ar comprimido.

Depois de um intervalo de tempo, variável, para cada amostra dependendo do grau de saturação inicial, em que a amostra fica submetida à pressão máxima de saturação, aumenta-se a pressão em um dos lados do sistema e observa-se se o fluxo é estacionário, através do controle das duas buretas. Se a quantidade de água que entra na amostra for a mesma que sai considera-se a amostra saturada e pronta para a realização do ensaio de permeabilidade. Se a amostra ainda não atingiu um re

gime de fluxo estacionário deixa-se por mais algum tempo saturando, no nível máximo de pressão.

O grau de saturação final é determinado após a realização do ensaio de permeabilidade através de cálculos indiretos, usando-se umidade final, índice de vazios e densidade real dos grãos, mostrados na folha de cálculo do ensaio na figura 15.

3.3.2 Ensaio

Após a saturação da amostra faz-se o ensaio de permeabilidade como descrito a seguir. Em um lado do sistema aplica-se uma pressão conhecida, com as válvulas (7) ou (8) abertas conforme o tipo de solo ensaiado; e do outro lado aplica-se uma pressão menor que a anterior, de modo que a diferença entre elas será a carga na amostra.

Lê-se nas escalas (5) as posições das interfaces e anota-se os seus valores. Conta-se o tempo a partir do momento em que as válvulas (9) são abertas até o seu fechamento, quando são novamente anotados as leituras das escalas. Quando a interface chega ao limite da escala, faz-se o recarregamento do tubo, tirando-se toda a pressão existente nos tubos U e abrindo-se, a seguir, as válvulas que ligam o reservatório de recarregamento com os tubos. Anota-se a temperatura lida num termômetro situado no painel.

3.3.3 Cálculo

De posse dos valores obtidos calcula-se o coeficiente de permeabilidade através da expressão:

$$k = \frac{Q}{A} \times \frac{L}{t} \times \frac{L}{h} \quad Q = (L_F - L_O) F_i$$

onde:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s)

Q = volume de água em cm^3

F_i = constante de calibração do tubo utilizado

L_O = leitura inicial

L_F = leitura final

A = seção transversal da amostra, (cm^2)

L = altura da amostra (cm)

t = tempo de escoamento correspondente ao volume Q , (s)

h = altura de carga correspondente a diferença de pressão aplicada, (cm)

Uma folha de cálculo do ensaio é mostrada na figura (15) contendo todos os dados referentes ao solo ensaiado, desde a compactação até o valor final da permeabilidade.

3.4 Análise de Erros

Para podermos analisar os valores dos coeficientes de permeabilidade encontrados fez-se necessário determinar os erros inerentes ao ensaio.

Os erros devido à calibração de tubos, determinação da área da amostra e altura são da ordem de 0,5%.

O erro devido a leitura do nível da interface para determinação da vazão é praticamente desprezível (da ordem de 0,3%).

A influência da precisão das pressões aplicadas depende do gradiente hidráulico usado no ensaio. Para gradientes baixos, de 80 a 200, os erros variam entre 5% e 2% e para gradientes altos, de 200 a 1600, os erros estão na faixa de 2% a 0,6%.

O erro devido a leitura do tempo no cronômetro depende do tempo decorrido durante o ensaio. Desta forma, para coeficientes de permeabilidade altos, onde o tempo de duração do ensaio é pequeno, o erro é da ordem de 3% e, para coeficientes de permeabilidade muito baixos, onde o tempo de duração do ensaio é lento, o erro é praticamente desprezível.

CAPÍTULO IV

CARACTERÍSTICAS DO SOLO UTILIZADO

4.1 Solo Utilizado

A amostra utilizada foi de solo argiloso proveniente da Rodovia Presidente Dutra, km 25. O solo foi extraído dos lados de um talude experimental a uma altura de 3,3 metros do pé do talude.

Na caracterização da amostra foram feitos ensaios com solo puro e com solo mais cal. A cal utilizada nestes ensaios foi hidróxido de cálcio pró-análise.

4.2 Métodos Utilizados nos Ensaios de Caracterização

A preparação das amostras para realização dos ensaios de caracterização foi feita através do método do DNER-ME-41-63.

Os ensaios de caracterização foram realizados segundo as seguintes normas.

Limite de liquidez de Solos LL	DNER-ME-44-71
Limite de Plasticidade LP	DNER-ME-82-63
Análise granulométrica	DNER-ME-51-64
Densidade real dos solos	DNER-ME-93-64
Limite de Contração L.C.	DNER-DPT-M-87-64
Contração Linear	
Compactação de solos	DNER-ME-48-64

4.3 Análise Química

A análise química do solo estudado foi feita no setor de Química do laboratório de Mecânica dos Solos da COPPE e apresentou os seguintes resultados.

Mineralogia

Caulinita - 69,5%

Gibbsita - 4,1 %

Óxido de ferro ($\text{Fe}_2 \text{O}_3$) + Rutilo - 6,0%

Quartzo - 20,5%

Ataque por ácido Sulfúrico

% SiO_2 - 32,34%

% AlO_3 - 30,20%

% FeO_3 - 6,00%

$$\frac{\text{Si O}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3} \text{ (ki)} = 1,82$$

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3} \text{ (k}_r\text{)} = 1,63$$

CTC = 7,0 meq / 100 g

Matéria orgânica 0,30%

4.4 Dosagem da Cal

EADES E GRIM (1966) propuzeram um método para de terminar a porcentagem necessária de cal para estabilizar um so lo. O método consiste em variar as porcentagens de cal adiciona

das ao solo e medir o pH da mistura solo-cal-água até encontrar-se o valor do pH igual a 12,4. Abaixo do pH 12,4 quase não se processam as reações pozolânicas, mas quando se atinge este valor ocorre uma dissolução da sílica que facilita as reações pozolânicas. Os resultados encontrados para o solo estudado são mostrados a seguir.

% de Cal	pH
2	12,25
3	12,40
4	12,70
5	13,2
6	14,0
Solo Puro	52,0

Em todos os ensaios realizados com mistura de solo cal, a porcentagem de cal utilizada foi de 3%, obtida do ensaio de Eades e Grim.

4.5 Resultados dos Ensaio de Caracterização

Na tabela (1) estão apresentados as características geotécnicas do solo puro e do solo com 3% de cal.

Na figura 16 tem-se a curva granulométrica completa do solo puro incluindo peneiramento e sedimentação. A figura 17 mostra a curva granulométrica do solo puro, não lavado, e do solo com 3% de cal também não lavado, com intuito de ava-

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

AMOSTRA	GRANULOMETRIA				LIMITE DE LIQUIDEZ L.L.	LIMITE DE PLASTICI- DADE L.P.	ÍNDICE DE PLASTICI- DADE I.P.	LIMITE DE CONTRAÇÃO L.C.	CONTRAÇÃO LINEAR C.L.	PESO ESP. DOS GRÃOS	PROCTOR NORMAL	
	AREIA MÉDIA	AREIA FINA	SILTE	ARGILA							12 golpes PESO ESP. APAR. SECO ys. (g/cm ³)	5 camadas UMIDADE ÓTIMA (%)
SOLO PURO	31	17	16	36	61	35,5	25,5	26,8	14,9	2,70	1,658	20,0
SOLO 3% CAL	-	-	-	-	66	46,6	19,4	36,8	11,9	2,69	1,566	22,0

liar a alteração que a cal provoca na granulometria.

Na figura 18 apresenta-se as curvas de compactação do tipo impacto para o solo puro e solo com 3% de cal e as correspondentes curvas de resistência à compressão simples.

Na figura 19 estão apresentadas as curvas de compactação tipo amassamento para amostras de solo puro com 3% de cal.

4.6 Discussão

A amostra de solo com 3% de cal, para realização dos ensaios de limite de liquidez, plasticidade, contração volumétrica, contração linear, e compactação, foram preparadas, adicionando-se a cal ao solo e homogeneizando-se a mistura com água até a umidade ótima do ensaio Proctor. Em seguida a mistura era colocada em sacos plásticos e ficava em câmara úmida por 24 horas antes da realização dos ensaios para que ocorressem as primeiras reações entre o solo e a cal.

Os resultados dos ensaios de limite de liquidez e plasticidade estão coerentes por ser o solo estudado uma argila predominantemente caulinítica. Segundo HERRIN e MITCHELL (1961) a caulinita tem pequena expansibilidade e baixa plasticidade e a cal promove nestes solos um aumento no limite de liquidez e no limite de plasticidade. O solo estudado não fugiu a este comportamento pois houve um acréscimo no limite de liquidez e um acréscimo maior no limite de plasticidade, fazendo com que o índice de plasticidade diminuísse de 25,5% para 19,5% com

a adição de 3% de cal.

O limite de contração aumentou com a adição da cal e a contração linear diminuiu, sendo estes resultados compatíveis com os esperados pois a cal diminuiu as variações de volume do solo.

As características da curva de compactação foram também modificadas pela adição da cal. A floculação da argila promovida pela cal impede que os esforços de compactação levem ao mesmo peso específico aparente seco obtido para o solo puro, encontrando-se valores mais baixos para o peso específico e mais altos para a umidade ótima, na mistura.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples dados na figura 18 mostram que 3% de cal foi suficiente para aumentar grandemente a resistência do solo estudado, com apenas 7 dias de cura.

A figura 17 mostra duas curvas granulométricas, uma para o solo puro e outra para o solo com 3% de cal. As amostras de solo puro e a de solo com 3% de cal foram destorrad~~a~~as no almofariz e logo após foi feito o peneiramento sem que se lavasse o material na peneira nº 200. As duas curvas encontradas mostram que a cal aumentou o tamanho médio dos grãos de solo e a porcentagem passando na peneira nº 200 de 18% para o solo, diminuiu a 1,5% para o solo com 3% de cal.

CAPÍTULO V

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

5.1 Permeabilidade de Amostras de Solo puro

As amostras de solo puro foram compactadas com três energias diferentes (15, 25 e 35 aplicações de carga por camada) e, logo após, realizado o ensaio de permeabilidade. As tabelas 2, 3 e 4 e as figuras 20, 21 e 22 mostram estes resultados para cada energia de compactação.

Os resultados obtidos estão em concordância com os apresentados por MITCHELL (1965). Para as três energias diferentes houve uma coerência nos valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos. Até a umidade ótima, isto é, no ramo seco da curva de compactação, os valores dos coeficientes de permeabilidade não tiveram muita variação. O aumento do peso específico aparente seco e da umidade de moldagem não proporcionou uma grande variação na permeabilidade no ramo seco. A partir da umidade ótima, nas três energias de compactação, houve um decréscimo brusco na permeabilidade. Isto se deve, segundo MITCHELL (1965), à formação de uma estrutura dispersa no solo, devido a compactação tipo amassamento.

Na figura 23 estão plotados as três curvas de compactação e as correspondentes curvas de permeabilidade. As curvas de permeabilidade "versus" umidade acompanham as curvas de compactação, isto é, para uma maior energia tem-se um menor va-

TABELA 2

AMOSTRA DE SOLO PURO ENERGIA: 15 APLIC.(17kgf) 5 CAMADAS					
h (%)	γ_s (g/cm ³)	k (cm/s)	ϵ	Sat.Inic. %	Sat.Final %
15,35	1,465	$7,76 \times 10^{-5}$	0,843	49,16	100,00
17,94	1,507	$8,79 \times 10^{-5}$	0,792	61,16	100,00
20,75	1,587	$6,63 \times 10^{-5}$	0,701	79,92	98,22
23,09	1,566	$1,13 \times 10^{-5}$	0,724	86,11	93,83
25,28	1,528	$1,17 \times 10^{-7}$	0,767	88,99	94,34

TABELA 3

AMOSTRA DE SOLO PURO ENERGIA: 25 APLIC.(17kgf) 5 CAMADAS					
h (%)	γ_s (g/cm ³)	k (cm/s)	ϵ	Sat.Inic. %	Sat.Final %
14,06	1,509	$2,68 \times 10^{-5}$	0,789	48,11	100,00
17,26	1,601	$2,78 \times 10^{-5}$	0,686	67,93	97,96
18,86	1,646	$7,19 \times 10^{-6}$	0,640	79,56	94,84
21,67	1,602	$5,17 \times 10^{-8}$	0,685	85,41	93,77
25,59	1,521	$6,44 \times 10^{-8}$	0,775	89,15	93,71

TABELA 4

AMOSTRA DE SOLO PURO ENERGIA: 35 APLIC.(17kgf) 5 CAMADAS					
h (%)	γ_s (g/cm ³)	k (cm/s)	ϵ	Sat.Inic. %	Sat.Final %
14,06	1,558	$3,07 \times 10^{-6}$	0,733	51,79	100,00
17,62	1,708	$1,08 \times 10^{-6}$	0,581	81,91	98,19
20,26	1,650	$7,95 \times 10^{-7}$	0,636	86,01	95,90
22,18	1,602	$4,20 \times 10^{-8}$	0,685	87,43	93,81
25,83	1,514	$7,14 \times 10^{-8}$	0,783	89,07	92,76

lor no coeficiente de permeabilidade.

Com os dados da figura 23, foram replotados os valores de permeabilidade sô que, agora, os resultados são apresentados em curvas de mesmo peso específico aparente seco. Estes resultados estão na figura 24 e tabela 5 e mostram que para um mesmo peso específico aparente seco tem-se diversos valores de permeabilidade, dependendo da umidade de moldagem e energia de compactação de cada amostra. Por exemplo, para um peso específico de $1,56 \text{ g/cm}^3$ a permeabilidade varia de $3,5 \times 10^{-5}$ a $3,6 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ para umidades de 14,1% a 23,9%. Vê-se pela figura 24 que a menor umidade não corresponde a menor permeabilidade, pois no desenvolvimento de uma curva de mesmo peso específico aparente seco ocorre uma variação da energia de compactação. O ponto onde ocorre o maior valor do coeficiente de permeabilidade indica a ocorrência naquele ponto da menor energia de compactação para se obter o mesmo valor do peso específico aparente de toda a curva.

A figura 25 e tabela 6 mostram com mais evidência a variação da permeabilidade com o peso específico aparente seco. As curvas são de umidades constantes e energia de compactação crescentes. Vê-se que para umidades mais baixas (até 20%) há um aumento do peso específico aparente seco e conseqüente decréscimo de permeabilidade para energias de compactação crescentes. Para umidades situadas no ramo úmido das curvas de compactação, por exemplo 23%, o aumento da energia não causou sensíveis variações no peso específico mas provocou uma queda na permeabilidade de $1,5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ para $3,0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$. Toda a energia de compactação, nesta umidade terá sido absorvida para promover uma mo

TABELA 5

AMOSTRA DE SOLO PURO-CURVAS DE MESMO PESO ESP. APAR. SECO γ_s									
$\gamma_s = 1,52 \text{ g/cm}^3$		$\gamma_s = 1,54 \text{ g/cm}^3$		$\gamma_s = 1,56 \text{ g/cm}^3$		$\gamma_s = 1,58 \text{ g/cm}^3$		$\gamma_s = 1,60 \text{ g/cm}^3$	
h %	k (cm/s)	h %	k (cm/s)	h %	k (cm/s)	h %	k (cm/s)	h %	k (cm/s)
13,00	$3,4 \times 10^{-6}$	13,60	$3,2 \times 10^{-6}$	14,10	$3,0 \times 10^{-6}$	14,50	$2,8 \times 10^{-6}$	15,00	$2,6 \times 10^{-6}$
14,50	$3,1 \times 10^{-5}$	15,20	$3,4 \times 10^{-5}$	15,90	$3,5 \times 10^{-5}$	16,50	$3,4 \times 10^{-5}$	17,20	$2,9 \times 10^{-5}$
17,80	$9,4 \times 10^{-5}$	18,70	$9,0 \times 10^{-5}$	19,50	$8,2 \times 10^{-5}$	20,40	$6,8 \times 10^{-5}$	21,85	$4,8 \times 10^{-8}$
25,60	$1,0 \times 10^{-7}$	24,60	$2,2 \times 10^{-7}$	23,50	$4,4 \times 10^{-6}$	22,20	$2,5 \times 10^{-5}$	22,30	$3,8 \times 10^{-8}$
25,60	$6,4 \times 10^{-8}$	24,60	$4,5 \times 10^{-8}$	23,65	$3,9 \times 10^{-8}$	22,70	$3,9 \times 10^{-8}$		
25,60	$6,0 \times 10^{-8}$	24,70	$4,1 \times 10^{-8}$	23,90	$3,6 \times 10^{-8}$	23,00	$3,5 \times 10^{-8}$		

TABELA 6

AMOSTRA DE SOLO PURO - CURVAS DE MESMA UMIDADE							
h %	$\gamma_s \text{ g/cm}^3$	k (cm/s)	Nº APL. P/CAM.	h (%)	$\gamma_s \text{ g/cm}^3$	k (cm/s)	Nº APL. P/CAM.
16,00	1,476	$9,0 \times 10^{-5}$	15	21,00	1,592	$5,6 \times 10^{-5}$	15
16,00	1,564	$3,5 \times 10^{-5}$	25	21,00	1,623	$1,5 \times 10^{-7}$	25
16,00	1,645	$2,2 \times 10^{-6}$	35	21,00	1,632	$1,1 \times 10^{-7}$	35
17,00	1,500	$9,6 \times 10^{-5}$	15	22,00	1,583	$3,0 \times 10^{-5}$	15
17,00	1,594	$3,1 \times 10^{-5}$	25	22,00	1,596	$4,6 \times 10^{-8}$	25
17,00	1,690	$2,0 \times 10^{-6}$	35	22,00	1,606	$4,2 \times 10^{-8}$	35
18,00	1,525	$9,2 \times 10^{-5}$	15	23,00	1,568	$1,1 \times 10^{-5}$	15
18,00	1,624	$1,8 \times 10^{-5}$	25	23,00	1,572	$3,8 \times 10^{-8}$	25
18,00	1,711	$1,7 \times 10^{-6}$	35	23,00	1,580	$3,5 \times 10^{-8}$	35
19,00	1,549	$8,8 \times 10^{-5}$	15	24,00	1,551	$1,1 \times 10^{-6}$	15
19,00	1,650	$6,0 \times 10^{-6}$	25	24,00	1,552	$4,0 \times 10^{-8}$	25
19,00	1,688	$1,5 \times 10^{-6}$	35	24,00	1,557	$3,6 \times 10^{-8}$	35
20,00	1,572	$7,6 \times 10^{-5}$	15	25,00	1,532	$1,2 \times 10^{-7}$	15
20,00	1,648	$1,3 \times 10^{-6}$	25	25,00	1,532	$5,0 \times 10^{-8}$	25
20,00	1,659	$9,6 \times 10^{-7}$	35	25,00	1,533	$4,5 \times 10^{-8}$	35

dificação de estrutura floculada para estrutura dispersa, o que ocasiona esta queda de permeabilidade. Os resultados mostrados na figura 25 estão em perfeita concordância com os obtidos por MITCHELL (1965) e apresentados na figura 8.

A figura 23 mostra que os valores de permeabilidade não estão tão bem definidos como os apresentados por MITCHELL (1965) e mostrados na figura 7. Houve uma parte da curva de permeabilidade "versus" umidade, em que coincidiram valores do coeficiente de permeabilidade para duas energias diferentes nos dados aqui encontrados.

Não foi observado nos resultados, um sensível aumento de permeabilidade com o aumento da umidade para uma mesma energia de compactação nos ramos iniciais das curvas ($k \times h$), como ocorreu nos resultados obtidos por MITCHELL (1965) mostrados nas curvas A e B da figura 7 e na figura 5. As curvas ($k \times h$) obtidas estão em concordância com os resultados de Lambe mostrados na figura 4 e com os de MITCHELL (1965) mostrados na figura 6 e figura 7 (curva C). Este comportamento variado da permeabilidade no ramo seco, é explicado por Mitchell como sendo uma decorrência do tipo de solo, da migração de finos durante a permeação, da energia de compactação e de uma saturação imperfeita. Pelo fato de não se ter obtido neste estudo o aspecto inicial das curvas de permeabilidade obtidas por Mitchell, considerado anormal, não se pode concluir que não tenham ocorrido a migração de finos e uma saturação imperfeita. Estes problemas podem ter ocorrido nos ensaios aqui realizados, mas não provocaram o aumento da permeabilidade no ramo seco. A diferença de comportamento talvez es

teja no fato de serem dois solos distintos, o objeto dos dois es
tudos.

5.2 Permeabilidade de amostras de solo com 3% de cal sem cura após a compactação

Para se estudar o efeito da cal na permeabilidade de solos compactados procedeu-se ao mesmo tipo de ensaios que nas amostras de solo puro, sendo adicionados 3% de cal hidratada em peso.

Os níveis de energia de compactação foram alterados para as amostras tratadas com cal, sendo utilizadas 25, 35 e 45 aplicações por camada para se conseguir pesos específicos aparentes mais altos, com o intuito de se comparar permeabilidades de amostras de solo puro e solo-cal com mesmo peso específico e mesma umidade. Isto porque os resultados obtidos na compactação tipo Proctor mostraram que os valores dos pesos específicos das amostras tratadas com cal decresceram muito para mesma energia de compactação.

Nas tabelas 7, 8 e 9 e nas figuras 26, 27 e 28 encontram-se os resultados dos ensaios de permeabilidade e compactação para cada uma das três energias de compactação escolhidas.

Na figura 29 estão agrupados os resultados das curvas de compactação e permeabilidade das três energias usadas. Comparando-se estes resultados (figura 29) para amostras de solo tratado com cal, com os obtidos para amostras de solo puro (figura 23) vê-se que as curvas de permeabilidade ficaram bem diferenciadas. No ramo seco das curvas de compactação para solo-cal, as permeabilidades não foram tão diferentes como foram para

TABELA 7

AMOSTRA SOLO 3% CAL - ENERGIA: 25 APL. (17kgf) - 5 CAMADAS					
h (%)	γ_s (g/cm ³)	k (cm/s)	ϵ	Sat.Inic. %	Sat.Fin. %
18,08	1,478	$1,47 \times 10^{-4}$	0,827	59,03	100,00
20,30	1,511	$6,59 \times 10^{-5}$	0,787	69,64	98,39
23,16	1,539	$2,95 \times 10^{-5}$	0,754	82,93	97,44
24,58	1,535	$9,64 \times 10^{-7}$	0,759	87,44	94,13
26,34	1,506	$1,06 \times 10^{-7}$	0,793	89,68	93,97

TABELA 8

AMOSTRA SOLO 3% CAL - ENERGIA: 35 APL. (17kgf) - 5 CAMADAS					
h (%)	γ_s (g/cm ³)	k (cm/s)	ϵ	Sat.Inic. %	Sat.Fin. %
18,75	1,492	$1,08 \times 10^{-4}$	0,810	62,50	99,00
20,23	1,523	$5,51 \times 10^{-5}$	0,773	70,66	98,50
22,03	1,578	$7,40 \times 10^{-6}$	0,711	83,66	96,95
25,13	1,543	$1,90 \times 10^{-7}$	0,750	90,47	95,22
26,08	1,526	$7,22 \times 10^{-8}$	0,769	91,57	94,80

TABELA 9

AMOSTRA SOLO 3% CAL - ENERGIA: 45 APL. (17kgf) - 5 CAMADAS					
h (%)	γ_s (g/cm ³)	k (cm/s)	ϵ	Sat.Ini. %	Sat.Fin. %
17,61	1,499	$1,10 \times 10^{-4}$	0,801	59,36	100,00
19,80	1,528	$5,20 \times 10^{-5}$	0,767	69,70	100,00
22,53	1,595	$4,14 \times 10^{-7}$	0,693	87,78	96,27
24,86	1,557	$7,87 \times 10^{-8}$	0,734	91,45	94,68
26,87	1,491	$8,67 \times 10^{-8}$	0,811	89,46	94,22

solo puro. No solo tratado com cal as permeabilidades foram altas no ramo seco das curvas de compactação variando pouco com a energia de compactação. Próximo às umidades ótimas, as energias de compactação tiveram um efeito maior, diferenciando as três curvas de permeabilidade. No ramo úmido, nota-se novamente uma convergência de valores dos coeficientes de permeabilidade.

Na figura 30 e tabela 10 encontram-se os dados da figura 29 replotados de forma a se ter curvas de iguais pesos específicos. Através desta figura pode-se avaliar o efeito da cal na permeabilidade de amostras compactadas. Para umidades baixas e mesmo peso específico o comportamento das amostras tratadas com cal e sem cura foi incerto, as vezes diminuindo a permeabilidade outras vezes aumentando. No ramo úmido, para amostras com mesmo peso específico aparente e mesma umidade, houve um aumento de permeabilidade para as amostras tratadas com cal. Uma amostra com 23% de umidade e peso específico aparente seco de $1,58 \text{ g/cm}^3$ tem coeficiente de permeabilidade de $3,5 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ para solo puro; quando tratado com 3% e sem cura após a compactação este coeficiente de permeabilidade aumenta consideravelmente passando para $2,0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$.

Analisando-se o efeito da cal na permeabilidade de amostras de solos compactados com 3% de cal sem cura, comparando-se apenas as energias de compactação, pode-se afirmar que a cal aumenta sensivelmente a permeabilidade dos solos compactados. As curvas de permeabilidade de solo com 3% de cal, obtidas através de compactação de 25 e 35 aplicações por camada deram valores bem mais altos que as correspondentes as curvas de solo

puro, tanto no ramo seco como no ramo úmido.

Na figura 31 e tabela 11 apresentam-se as curvas de iguais umidade de amostras de solo-cal. Vê-se por estas curvas que a cal alterou bastante a estrutura do solo. Não foram obtidas os mesmos tipos de curvas que no solo puro, pois as curvas que, para este, se apresentavam praticamente na vertical com grande variação de permeabilidade, apresentam uma inclinação maior e valores de coeficientes de permeabilidade bem maiores, para os solos tratados com cal. A inclinação das curvas nas umidades altas indica que o aumento da energia de compactação elevou o peso específico seco de amostras de solo-cal e somente uma parte desta energia proporcionou a dispersão da estrutura da amostra, deixando as permeabilidades bem maiores.

TABELA 10

AMOSTRA DE SOLO COM 3% DE CAL - CURVAS DE MESMO PESO ESP. APAR. SECO γ_s							
$\gamma_s = 1,52 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_s = 1,54 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_s = 1,56 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_s = 1,58 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	
h (%)	k (cm/s)	h (%)	k (cm/s)	h (%)	k (cm/s)	h (%)	k (cm/s)
18,70	$8,8 \times 10^{-5}$	19,80	$5,2 \times 10^{-5}$	20,70	$2,0 \times 10^{-5}$	21,65	$2,9 \times 10^{-6}$
19,80	$6,6 \times 10^{-5}$	20,70	$3,7 \times 10^{-5}$	21,30	$2,0 \times 10^{-5}$	22,20	$6,3 \times 10^{-6}$
21,00	$5,4 \times 10^{-5}$	23,30	$2,5 \times 10^{-5}$	24,20	$3,4 \times 10^{-7}$	23,00	$2,0 \times 10^{-6}$
25,60	$2,0 \times 10^{-7}$	23,70	$1,2 \times 10^{-5}$	24,80	$7,6 \times 10^{-8}$	24,00	$1,5 \times 10^{-7}$
26,20	$6,4 \times 10^{-8}$	25,30	$1,2 \times 10^{-7}$	-	-	-	-
-	-	25,50	$6,6 \times 10^{-8}$	-	-	-	-

TABELA 11

AMOSTRA DE SOLO COM 3% DE CAL - CURVAS DE MESMA UNIDADE							
h (%)	$\gamma_s \text{ (g/cm}^3\text{)}$	k (cm/s)	Nº APLIC P/CAM.	h (%)	$\gamma_s \text{ (g/cm}^3\text{)}$	k (cm/s)	Nº APLIC P/CAM.
19,00	1,491	$1,1 \times 10^{-4}$	25	23,00	1,538	$3,2 \times 10^{-5}$	25
19,00	1,498	$9,4 \times 10^{-5}$	35	23,00	1,580	$2,0 \times 10^{-6}$	35
19,00	1,525	$7,8 \times 10^{-5}$	45	23,00	1,598	$2,7 \times 10^{-7}$	45
20,00	1,506	$7,4 \times 10^{-5}$	25	24,00	1,538	$4,0 \times 10^{-6}$	25
20,00	1,522	$6,0 \times 10^{-5}$	35	24,00	1,564	$4,5 \times 10^{-7}$	35
20,00	1,542	$4,5 \times 10^{-5}$	45	24,00	1,580	$1,2 \times 10^{-7}$	45
21,00	1,520	$5,4 \times 10^{-5}$	25	25,00	1,529	$5,0 \times 10^{-7}$	25
21,00	1,549	$2,6 \times 10^{-5}$	35	25,00	1,546	$1,5 \times 10^{-7}$	35
21,00	1,566	$1,3 \times 10^{-5}$	45	25,00	1,554	$7,2 \times 10^{-8}$	45
22,00	1,530	$4,4 \times 10^{-5}$	25	26,00	1,512	$1,4 \times 10^{-7}$	25
22,00	1,577	$8,0 \times 10^{-6}$	35	26,00	1,525	$7,4 \times 10^{-8}$	35
22,00	1,588	$1,3 \times 10^{-6}$	45	26,00	1,525	$6,3 \times 10^{-8}$	45

5.3 Permeabilidade de Amostras de Solo com 3% de Cal e 7 dias de Cura após a Compactação.

Completando-se o estudo de permeabilidade de solos tratados com cal, ensaiou-se amostras de solo com 3% de cal e submetidas à cura por 7 dias em câmara úmida, à temperatura em torno de 25°C, para avaliar-se o efeito da cura na permeabilidade deste solo tratado com cal.

As figuras 32, 33, 34 e tabelas 12, 13 e 14 mostram os resultados dos ensaios de permeabilidade e as condições de compactação para os solos tratados com cal e curados a 7 dias.

A figura 35 mostra os resultados de permeabilidade para todos os níveis de energia de compactação utilizados para as amostras de solo cal com cura. Comparando-se os resultados de permeabilidade para uma mesma energia de amostras de solo-cal (figura 29) e solo-cal com cura (figura 35) vê-se que a cura proporcionou um aumento na permeabilidade. As curvas de permeabilidade de amostras de solo-cal curadas estão sempre acima das curvas de solo-cal sem cura, dando maiores valores de permeabilidade, se comparadas na mesma energia.

Analisando-se amostras com mesmo peso específico e mesma umidade, baseados na figura 36 e tabela 15, para solo-cal com cura, e figura 30 para solo cal sem cura, o efeito da cura nos solos tratados com cal apresenta em geral, pequenos acréscimos na permeabilidade. Se se comparar os resultados de solo puro (figura 24) com os de solo-cal com cura (figura 36)

TABELA 12

AMOSTRA DE SOLO 3% CAL CURA 7 DIAS - ENERGIA: 25 APL. (17kgf) 5 CAMADAS					
h(%)	γ_s (g/cm ³)	k (cm/s)	ϵ	Sat.Inic. %	Sat.Fin. %
18,26	1,506	$1,72 \times 10^{-4}$	0,793	62,17	100,00
19,84	1,524	$1,23 \times 10^{-4}$	0,773	69,39	98,97
22,65	1,550	$5,02 \times 10^{-5}$	0,742	82,42	95,33
24,21	1,530	$8,00 \times 10^{-6}$	0,765	85,45	94,59
26,12	1,496	$7,03 \times 10^{-6}$	0,806	87,61	94,25

TABELA 13

AMOSTRA DE SOLO 3% CAL CURA 7 DIAS - ENERGIA: 35 APL. (17kgf) 5 CAMADAS					
h(%)	γ_s (g/cm ³)	k (cm/s)	ϵ	Sat.Inic. %	Sat.Fin. %
18,70	1,551	$8,98 \times 10^{-5}$	0,741	68,14	99,84
19,87	1,572	$9,07 \times 10^{-5}$	0,718	74,72	98,80
22,16	1,575	$3,89 \times 10^{-5}$	0,714	83,80	98,32
24,60	1,537	$1,10 \times 10^{-6}$	0,757	87,74	95,59
26,13	1,523	$2,11 \times 10^{-7}$	0,773	91,27	94,66

TABELA 14

AMOSTRA SOLO 3% CAL CURA 7 DIAS ENERGIA: 35 APL. (17kgf) 5 CAMADAS					
h(%)	γ_s (g/cm ³)	k (cm/s)	ϵ	Sat.Inic. %	Sat.Fin. %
18,02	1,550	$7,13 \times 10^{-5}$	0,742	65,57	100,00
20,40	1,587	$5,60 \times 10^{-5}$	0,701	78,57	98,99
21,62	1,598	$1,76 \times 10^{-5}$	0,690	84,60	98,22
25,00	1,551	$1,21 \times 10^{-7}$	0,741	91,09	97,29
25,95	1,523	$5,61 \times 10^{-8}$	0,773	90,64	95,90

TABELA 15

AMOSTRA DE SOLO 3% CAL CURA 7 DIAS - CURVAS DE MESMO PESO ESP. APAR. SECO γ_s							
$\gamma_s = 1,52 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_s = 1,54 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_s = 1,56 \text{ (g/cm}^3\text{)}$		$\gamma_s = 1,58 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	
h (%)	k (cm/s)	h (%)	k (cm/s)	h (%)	k (cm/s)	h (%)	k (cm/s)
19,50	$1,5 \times 10^{-4}$	21,00	$9,0 \times 10^{-5}$	18,50	$7,4 \times 10^{-5}$	19,80	$6,2 \times 10^{-5}$
24,70	$3,0 \times 10^{-6}$	23,50	$1,9 \times 10^{-5}$	19,30	$9,2 \times 10^{-5}$	20,60	$7,9 \times 10^{-5}$
26,00	$2,2 \times 10^{-7}$	24,40	$1,3 \times 10^{-6}$	23,15	$9,8 \times 10^{-6}$	22,00	$4,3 \times 10^{-5}$
		25,50	$7,6 \times 10^{-8}$	24,50	$1,8 \times 10^{-7}$	23,20	$1,3 \times 10^{-6}$

TABELA 16

AMOSTRA SOLO COM 3% DE CAL CURA 7 DIAS - CURVAS DE MESMA UNIDADE							
h (%)	$\gamma_s \text{ (g/cm}^3\text{)}$	k (cm/s)	Nº APLIC P/CAM.	h (%)	$\gamma_s \text{ (g/cm}^3\text{)}$	K (cm/s)	Nº APLIC P/CAM.
18,00	1,504	$1,8 \times 10^{-4}$	25	23,00	1,546	$3,5 \times 10^{-5}$	25
18,00	1,540	$9,0 \times 10^{-5}$	35	23,00	1,562	$1,2 \times 10^{-5}$	35
18,00	1,550	$7,2 \times 10^{-5}$	45	23,00	1,582	$1,7 \times 10^{-6}$	45
19,00	1,515	$1,6 \times 10^{-4}$	25	24,00	1,532	$9,0 \times 10^{-6}$	25
19,00	1,556	$9,2 \times 10^{-5}$	35	24,00	1,546	$2,3 \times 10^{-6}$	35
19,00	1,568	$7,4 \times 10^{-5}$	45	24,00	1,568	$3,5 \times 10^{-7}$	45
20,00	1,527	$1,3 \times 10^{-4}$	25	25,00	1,516	$2,0 \times 10^{-6}$	25
20,00	1,571	$9,0 \times 10^{-5}$	35	25,00	1,532	$5,4 \times 10^{-7}$	35
20,00	1,584	$6,4 \times 10^{-5}$	45	25,00	1,550	$1,2 \times 10^{-7}$	45
21,00	1,540	$9,8 \times 10^{-5}$	25	26,00	1,498	$7,2 \times 10^{-7}$	25
21,00	1,584	$7,0 \times 10^{-5}$	35	26,00	1,520	$2,1 \times 10^{-7}$	35
21,00	1,598	$3,4 \times 10^{-5}$	45	26,00	1,527	$5,4 \times 10^{-8}$	45
22,00	1,550	$6,6 \times 10^{-5}$	25				
22,00	1,580	$4,1 \times 10^{-5}$	35				
22,00	1,596	$1,0 \times 10^{-5}$	45				

obtem-se sempre um acréscimo na permeabilidade das amostras de solo-cal curadas em relação as amostras de solo puro para uma mesma umidade e peso específico aparente seco.

Na figura 37 tem-se plotados permeabilidade "versus" peso específico aparente seco em curvas de iguais umidades, para solo-cal com cura. Estas curvas não diferem muito das encontradas para solo-cal sem cura, mas estão bastante diferentes das obtidas para solo puro. As amostras compactadas de solo-cal com cura e "sem cura", foram submetidas a uma cura de 24 horas antes da compactação. Pelos resultados obtidos, observa-se que a cura inicial com o solo solto foi o que repercutiu mais fortemente na permeabilidade, aumentando-a. Após a homogenização da cal, solo e água ocorreu uma floculação da estrutura e uma possível cimentação. Depois das 24 horas de cura os esforços de compactação não foram suficientes para levar o solo a uma estrutura tão dispersa como a obtida para solo puro, dando maiores valores do coeficiente de permeabilidade para umidades mais altas. Para as amostras de solo-cal curadas após a compactação a permeabilidade aumentou um pouco mais, devido a uma pequena floculação obtida depois dos 7 dias de cura. Por exemplo uma amostra com $1,52 \text{ g/cm}^3$ de peso específico aparente seco e umidade de 25,6% apresentou permeabilidades de $5,6 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ para solo puro, $2,0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ para solo-cal sem cura e $4,0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ para solo-cal com cura.

5.4 Variação do Gradiente Hidráulico

Na realização dos ensaios de permeabilidade com o permeâmetro tipo Mitchell foi grande a variação no valor do gradiente hidráulico aplicado nos diversos pontos da curva de compactação. Nos primeiros pontos da curva de compactação quando a umidade de moldagem está abaixo da umidade ótima, a permeabilidade é maior e os gradientes usados foram menores; acima da umidade ótima a permeabilidade diminui muito e usou-se gradientes hidráulicos mais altos.

As tabelas 17, 18, 19 esquematizam os gradientes usados em todos os ensaios realizados, segundo os pontos da curva de compactação e número de aplicações por camada.

A variação de gradientes hidráulicos em uma mesma curva de compactação foi muito grande (de 80 até 600), levando-nos a pensar que a permeabilidade estaria variando não somente devido a variação de densidade e umidade de moldagem (alteração da estrutura do solo), mas também devido a esta grande variação de gradientes hidráulicos.

Realizaram-se, então diversos ensaios de permeabilidade com amostras com diferentes coeficientes de permeabilidade variando-se o gradiente hidráulico. Visava-se detectar o possível erro devido a esta alteração de gradiente, para que pudesse ser, posteriormente, corrigido. Embora as amostras estivessem em condições diferentes houve grande semelhança nos resultados encontrados.

TABELA 17
SOLO PURO

ENERGIA	GRADIENTES HIDRÁULICOS				
	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5
15	80	80	80	400	600
25	80	80	80	400	480
35	80	200	600	600	600

TABELA 18
SOLO + 3% DE CAL

ENERGIA	GRADIENTES HIDRÁULICOS				
	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5
25	80	80	200	600	600
35	80	80	80	600	600
45	80	80	600	600	600

TABELA 19
SOLO + 3% DE CAL + 7 DIAS DE CURA

ENERGIA	GRADIENTES HIDRÁULICOS				
	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	PONTO 4	PONTO 5
25	80	80	80	160	400
35	80	80	80	400	600
45	80	80	200	600	600

A figura 38 mostra a variação da permeabilidade de vido ao acréscimo de gradiente hidráulicos para uma das amostras. Nesta, a umidade de compactação foi de 21,86%, peso específico seco de $1,545 \text{ g/cm}^3$ e grau de saturação inicial de 78,90%. Após a saturação, foi realizado o ensaio de permeabilidade sujeito a diversos gradientes e o grau de saturação após o ensaio foi de 99,8%. Observa-se, por esta figura, que a variação dos gradientes hidráulicos de 80 a 600 não alterou sensivelmente o valor do coeficiente de permeabilidade para que houvesse necessidade de uma correção. Para este corpo de prova a média dos coeficientes de permeabilidade, nos diversos gradientes utilizados foi de $3,45 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, o desvio padrão de $0,14 \times 10^{-5}$ e o coeficiente de variação de 4%, o que indica a satisfatória repetibilidade dos valores do coeficiente de permeabilidade independente do gradiente utilizado.

Na figura 39 tem-se plotado velocidade de descarga versus gradiente hidráulico, ilustrando melhor que não houve desvios de lei de Darcy devido aos grandes gradientes. Os desvios da lei de Darcy só ocorrem para argilas-siltosas quando se está trabalhando com gradientes hidráulicos muito baixos como foi mostrado por MITCHELL e YOUNGER(1967). Os resultados encontrados neste trabalho avaliando a influência de altos gradientes na permeabilidade estão em perfeita concordância com os resultados encontrados por HOOPER mostrados na figura 10.

O erro devido a variação de gradiente hidráulico está na mesma faixa de valores dos erros inerentes ao ensaio de permeabilidade; por este motivo não se fez a correção devido à

variação de gradiente hidráulico.

CAPÍTULO VI

MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

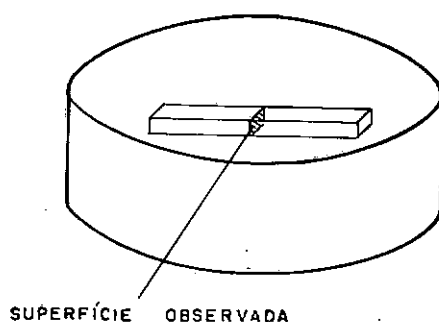
6.1 Introdução

A observação da estrutura das amostras correspondentes a diversos pontos da curva de compactação, realizou-se com o microscópio eletrônico de varredura. Conforme mostrou ALVARENGA (1974) este método permite uma melhor observação da distribuição das partículas devido ao alto poder de penetração do feixe de elétrons e devido ao seu grande poder de resolução, o que possibilita a observação de partículas individuais e seu arranjo.

O microscópio eletrônico de varredura consiste em uma fonte de elétrons, que são acelerados após a saída da fonte e dirigidos através de vácuo para a superfície da amostra. Ao atingir a superfície da amostra parte dos elétrons penetra nela e parte é refletida e captada por um sistema coletor onde a energia destes elétrons é transformada em energia luminosa. Através de um fotomultiplicador e de um ampliador, a energia luminosa é transformada em energia elétrica e ampliada. Um tubo de raios catódicos reproduz a imagem da área observada em função da varredura do feixe de elétrons na superfície da amostra.

6.2 Preparo da Amostra

Após a realização do ensaio de permeabilidade das amostras compactadas a diversas unidades, cortaram-se de algumas amostras, elementos com dimensões aproximadas de 3,0 cm x 1,0 cm x 1,0 cm. O posicionamento de um elemento de solo cortado da amostra está mostrado no esquema abaixo.



A superfície da amostra a ser observada no microscópio é a que se obtém pelo fraturamento por flexão da amostra, segurando-se com as pontas dos dedos as duas extremidades da mesma.

As amostras para serem observadas no microscópio não devem conter água nos poros, pois que submetidas ao vácuo no interior do microscópio, perderiam parte de sua umidade, o que provocaria uma perturbação no arranjo original das partículas. Portanto, após o corte das amostras, estas foram deixadas ao ar para que houvesse perda de umidade. Em complementação estas amostras foram colocadas em dessecador contendo nitrato de amônia para que perdessem a umidade remanescente que era igual a umidade higroscópica.

O processo de fraturamento definiu em todas as amostras uma superfície muito acidentada provocando uma diminui

ção no poder de resolução do microscópio eletrônico.

Após a obtenção da superfície a ser observada, colou-se a amostra em bases-suportes, ficando a mesma com dimensões aproximadas de 1,0 cm x 1,0 cm x 0,5 cm.

Toda a superfície da amostra foi coberta com uma camada de ouro da espessura da ordem de 200\AA . Esta cobertura com material condutor, impede o carregamento eletrostático da amostra, o que prejudicaria sua observação por baixar o poder de resolução.

Foram observadas no microscópio 7 amostras de diferentes teores de umidade na hora de compactação e pesos específicos aparente seco:

- 4 amostras de solo puro compactado por amassamento com 15 aplicações de 17 kgf por camada e em 5 camadas;
- 3 amostras de solo tratado com 3% de cal sujeito a 7 dias de cura antes da realização do ensaio de permeabilidade e compactadas por amassamento com 25 aplicações de 17 kgf por camada e em 5 camadas.

As fotografias mostradas a seguir foram obtidas no microscópio eletrônico de varredura da marca CAMBRIDGE modelo MARK IIA do Programa de Engenharia Metalúrgica e Ciência dos Materiais da COPPE/UFRJ. Os números apresentados para cada fotografia correspondem, respectivamente, ao aumento da fotografia, valor da escala (traço preto), situada embaixo e à esquerda da fotografia, e ao ângulo que a normal à superfície faz com a direção de observação.

faz com o feixe de elétrons.

6.3 Amostras observadas no microscópio

6.3.1 Amostras de solo-puro

Para a observação da estrutura de solo puro através do microscópio eletrônico de varredura utilizou-se amostras de quatro pontos da curva de compactação com energia de 15 aplicações de 17 kgf por camada e em 5 camadas. A curva de compactação e a correspondente curva de permeabilidade estão mostradas na figura 20 e os pontos observados foram os seguintes:

Ponto 2

Umidade de moldagem = 17,94%

Umidade após ensaio = 29,42%

Peso espec.ap. seco = $1,507 \text{ g/cm}^3$

Permeabilidade = $8,79 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

Ponto 3

Umidade de moldagem = 20,15%

Umidade após ensaio = 25,50%

Peso espec. ap. seco = $1,587 \text{ g/cm}^3$

Permeabilidade = $6,63 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

Ponto 4

Umidade de moldagem = 23,09%

Umidade após ensaio = 25,16%

Peso espec.ap. seco = $1,566 \text{ g/cm}^3$

Permeabilidade = $1,13 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

Ponto 5

Umidade de moldagem = 25,28%

Umidade após ensaio = 26,80%

Peso espec. ap. seco = 1,528 g/cm³

Permeabilidade = 1,17 x 10⁻⁷ cm/s

As umidades atingidas pelas amostras de solo puro após a realização do ensaio de permeabilidade estavam sempre abaixo do valor do limite de contração do solo puro (LC=26,8%), exceto para o ponto 2 em que a umidade final foi pouco maior que o limite de contração. Isto nos garante quanto a estrutura das amostras observadas ser a mais real possível, pois estando as amostras em umidades inferiores ao limite de contração, não ocorrerá contração e não haverá rearranjo de partículas durante o processo de secagem.

Nas amostras obtidas dos pontos 2 e 3, da curva de compactação espera-se encontrar uma estrutura mais floculada, visto que os valores dos coeficientes de permeabilidade foram bem altos (da ordem de 10⁻⁵ cm/s).

Da amostra obtida através do ponto 5 da curva de compactação espera-se encontrar maior grau de dispersão das partículas de argila, pois o coeficiente de permeabilidade encontrado neste ponto foi de 1,17 x 10⁻⁷ cm/s, o mais baixo para esta energia de compactação..

6.3.2 Amostras de solo com 3% de cal

As amostras de solo-cal utilizadas para observa-

ção no microscópio foram as da curva de compactação com energia de 25 aplicações de 17 kgf por camada e em 5 camadas, mostrada na fig. 32, sendo os seguintes os pontos observados:

Ponto 2

Umidade de moldagem = 19,84%

Umidade após ensaio = 28,30%

Peso espec.ap. seco = 1,524 g/cm³

Permeabilidade = $1,23 \times 10^{-4}$ cm/s

Ponto 3

Umidade de moldagem = 22,65%

Umidade após ensaio = 26,20%

Peso espec.ap. seco = 1,550 g/cm³

Permeabilidade = $5,02 \times 10^{-5}$ cm/s

Ponto 5

Umidade de moldagem = 26,12%

Umidade após ensaio = 28,10%

Peso espec.ap. seco = 1,496 g/cm³

Permeabilidade = $7,03 \times 10^{-7}$ cm/s

Para as amostras de solo-cal também não ocorreu contração durante a secagem. O valor do limite de contração foi de 36,80% e todas as amostras observadas estavam com umidades inferiores a este valor antes da secagem ao ar livre.

Espera-se observar nos Pontos 2 e 3 da curva de compactação uma estrutura floculada e para o ponto 5 estrutura

dispersa baseados também nos ensaios de permeabilidade.

6.3.3 Amostras dispersas de cal pura

Para melhor compreensão das fotografias de amostras de solo-cal fez-se necessária a observação de amostras de cal pura, para que se pudesse indentificá-la quando nas fotografias.

Tomou-se determinada quantidade da cal utilizada e fez-se a dispersão em uma solução com hexametáfosfato de sódio. Após uma agitação da mistura transferiu-se algumas gotas para uma lâmina de vidro que havia sido previamente colada na base suporte de amostras do microscópio. Após a evaporação completa da solução no interior do dessecador deu-se a cobertura com material condutor de espessura aproximada de 100 Å.

6.4 Fotografias

CAL PURAMATERIAL DISPERSO

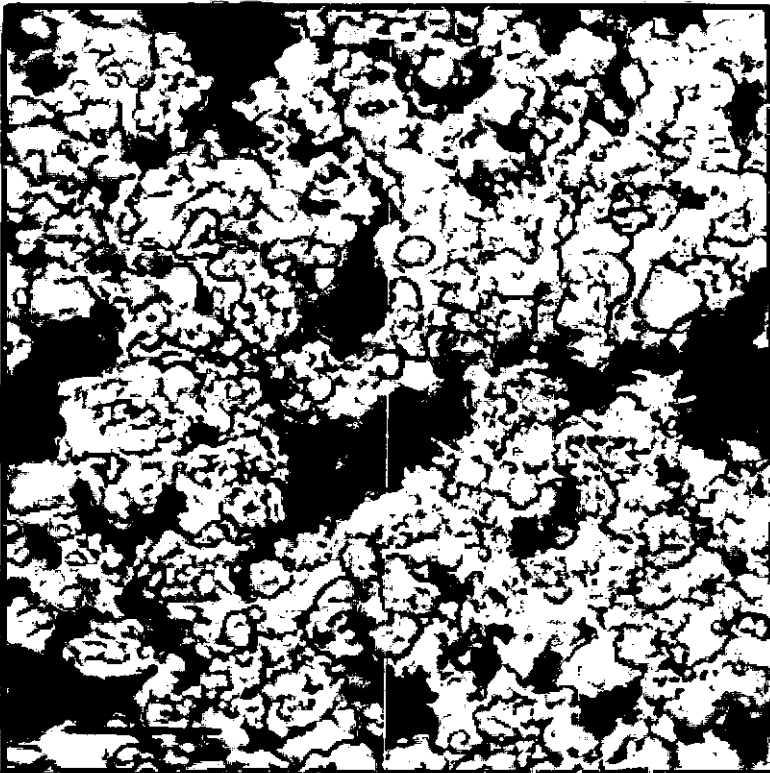
- a) A foto mostra a superfície geral da amostra de cal onde se vê grumos de partículas de cal
- b) e c) Nas fotos com aumentos, maiores vê-se agora partículas individuais de cal, aglutinadas em forma de cachos.

Número	Angulo de Observação	Aumento	Escala
a) 29556	20°	600X	33µm
b) 29555	20°	1200X	17µm
c) 29554	20°	2400X	8µm

(a)



(b)



(c)



Ponto 2Solo puro

$$h = 17,94\%$$

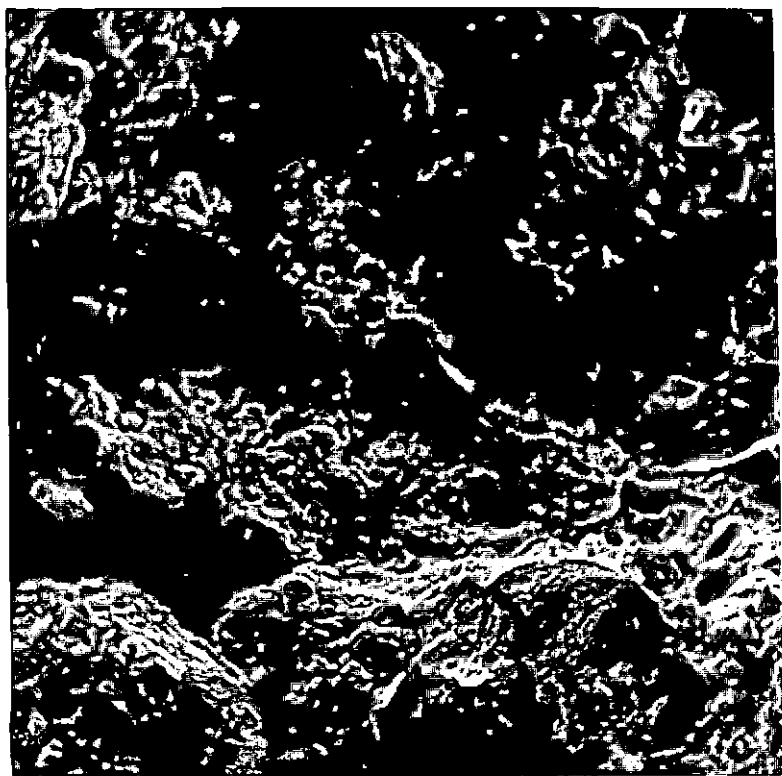
$$\gamma_s = 1,507 \text{ g/cm}^3$$

$$k = 8,79 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

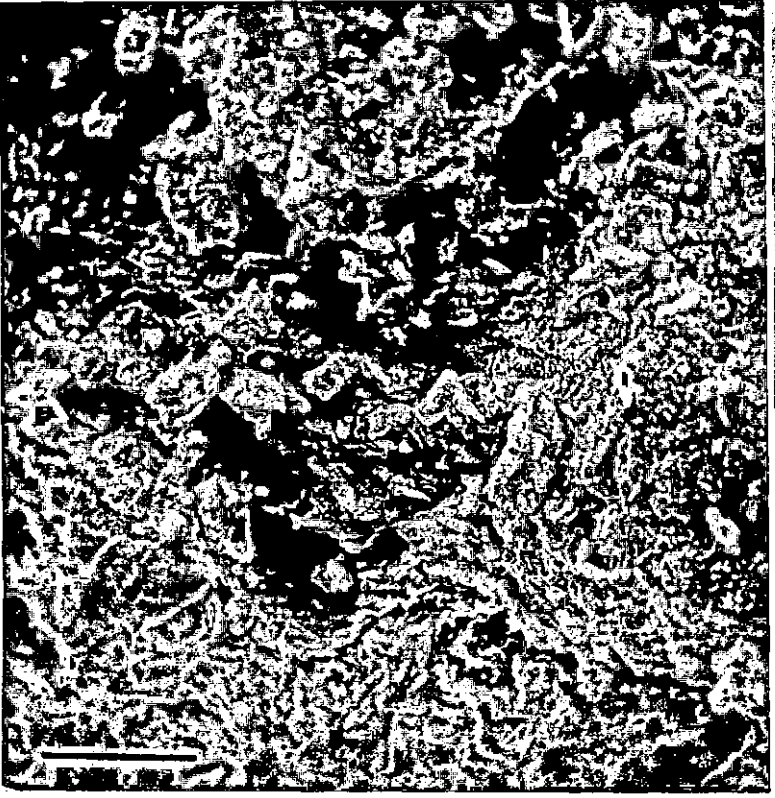
- a) Aspecto geral da superfície da amostra. Nota-se a topografia acidentada da superfície e se consegue distinguir partículas de areia recobertas por partículas menores de silte e argila.
- b) e c) As duas fotografias mostram partículas de argila dispostas randomicamente, estando coerente com o alto valor de coeficiente de permeabilidade encontrado para esta amostra.
- d) e e) As fotos mostram com diferentes graus de aumento partículas de argila floculadas de tal forma que permitem mais facilmente a passagem da água.

Número	Angulo de Observação	Aumento	Escala
a) 28317	0°	115X	174µm
b) 28561	20°	550X	36µm
c) 28562	20°	2200X	9µm
d) 29560	20°	5500X	3,6µm
e) 29559	20°	11000X	1,8µm

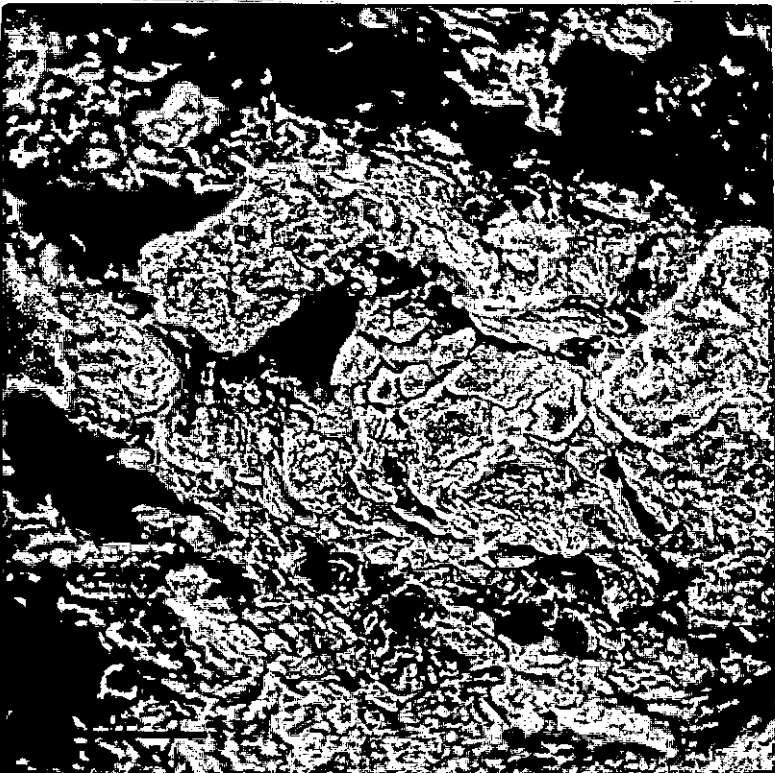
(a)



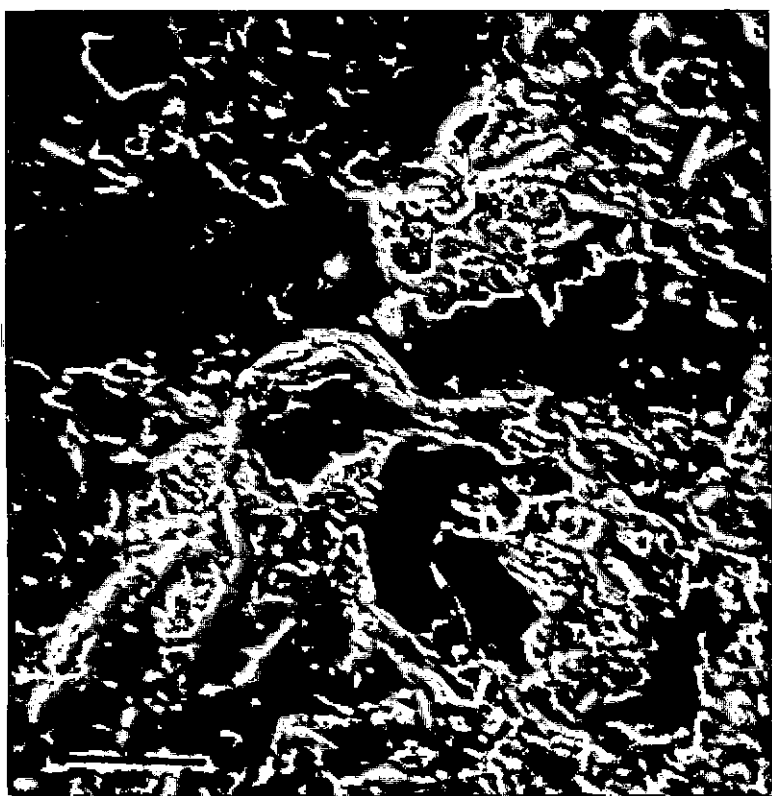
(b)



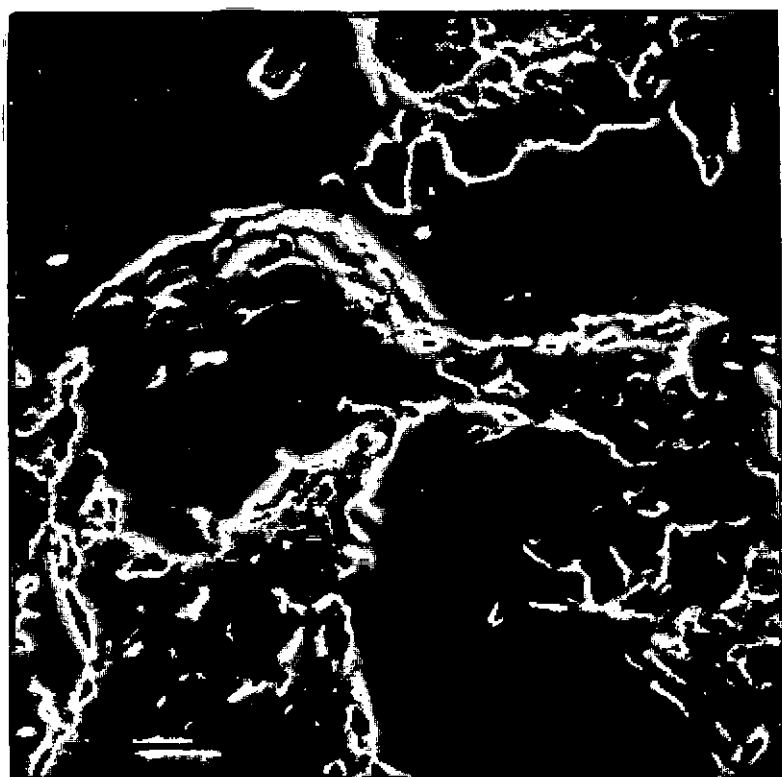
(c)



(d)



(e)



Ponto 2.Solo com 3% de Cal

$$h = 19,84\%$$

$$\gamma_s = 1,524 \text{ g/cm}^3$$

$$k = 1,23 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

- a) Partículas de areia fina ligadas a outras partículas através do cimento formado pela cal e argila.
- b) Esta foto é um detalhe da anterior onde se observa o contato entre duas partículas de areia.
- c) d) e) As três fotos mostram em aumentos crescentes o grau de floculação das partículas de argila desta amostra.

Número	Angulo de Observação	Aumento	Escala
a) 28731	15°	550X	36µm
b) 28732	15°	1100X	18µm
e) 28982	0°	2300X	9µm
d) 28981	0°	5750X	3,4µm
e) 28980	0°	11500X	1,7µm

(a)



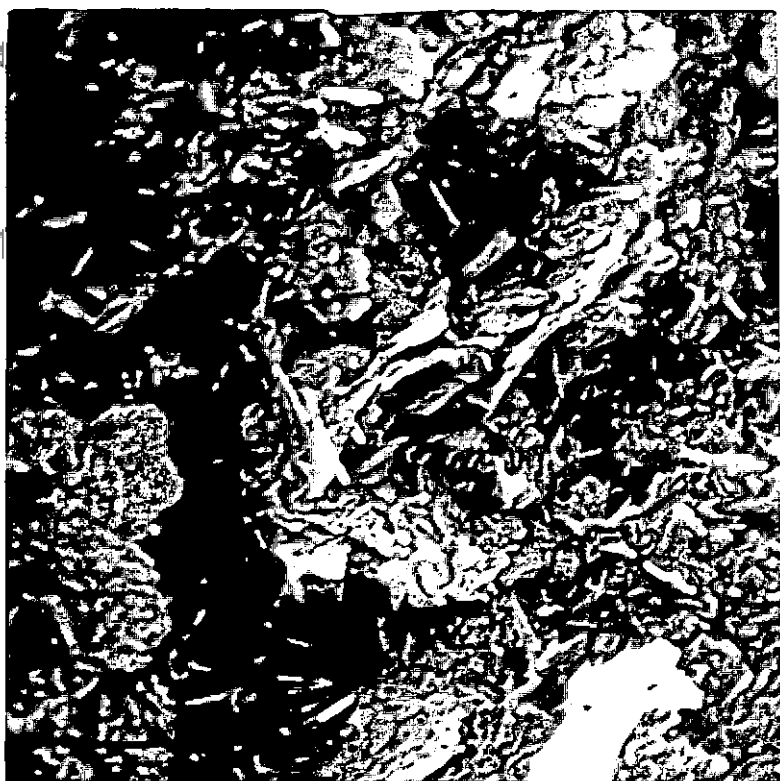
(b)



(c)



(d)



(e)



Ponto 3Solo Puro

$$h = 20,15\%$$

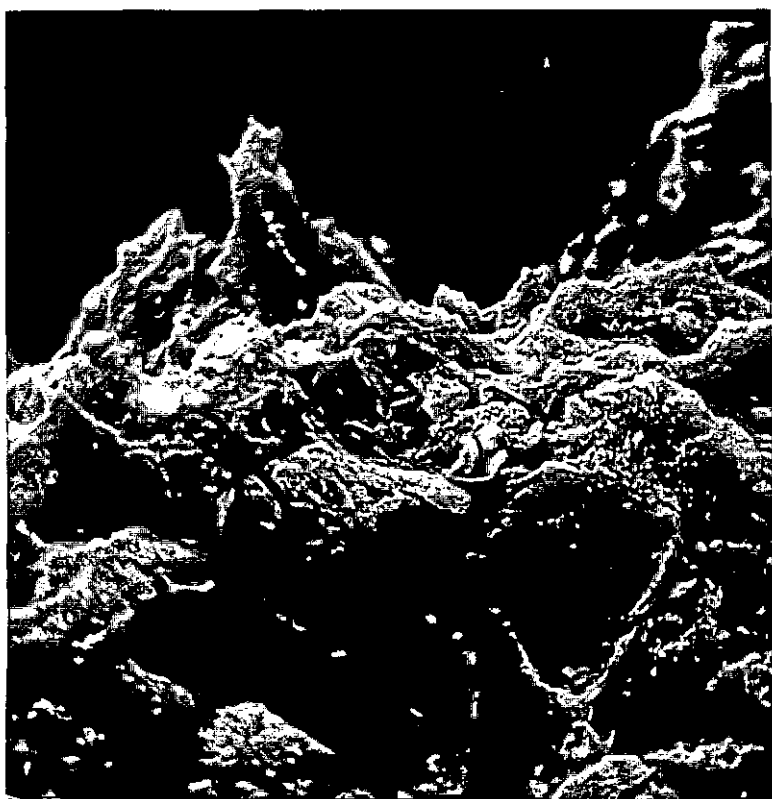
$$\gamma_s = 1,587 \text{ g/cm}^3$$

$$k = 6,63 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

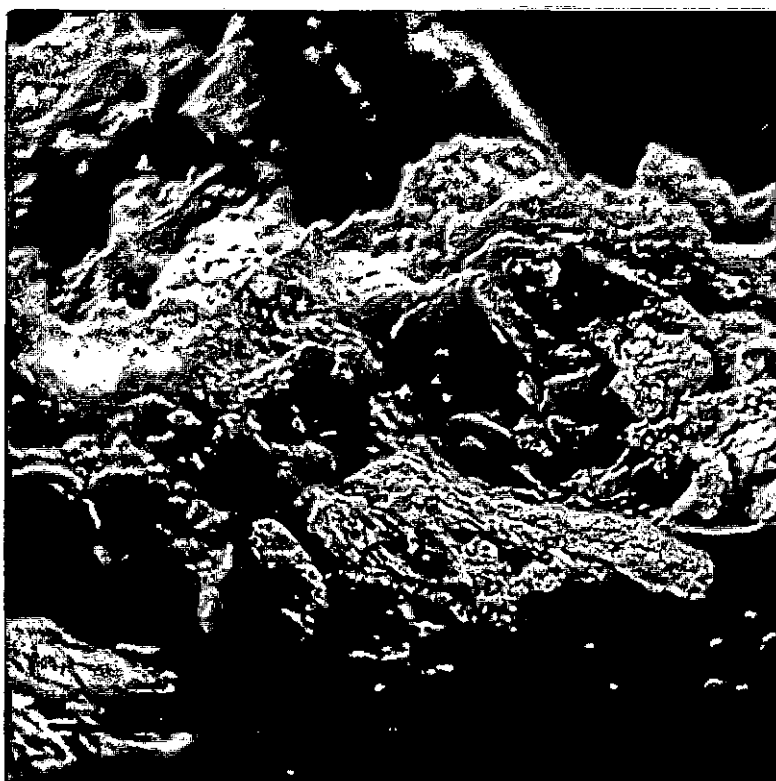
a) b) e c) Sequência de fotos em aumentos crescentes que mostram uma pequena orientação nas partículas de silte e argila. A foto c mostra melhor esta ligeira orientação.

Número	Angulo de Observação	Aumento	Escala
a) 28324	22°	550X	36µm
b) 28325	22°	1100X	18µm
c) 28326	22°	2200X	9µm

(a)



(b)



(c)



Ponto 3Solo com 3% de cal

$$h = 22,65\%$$

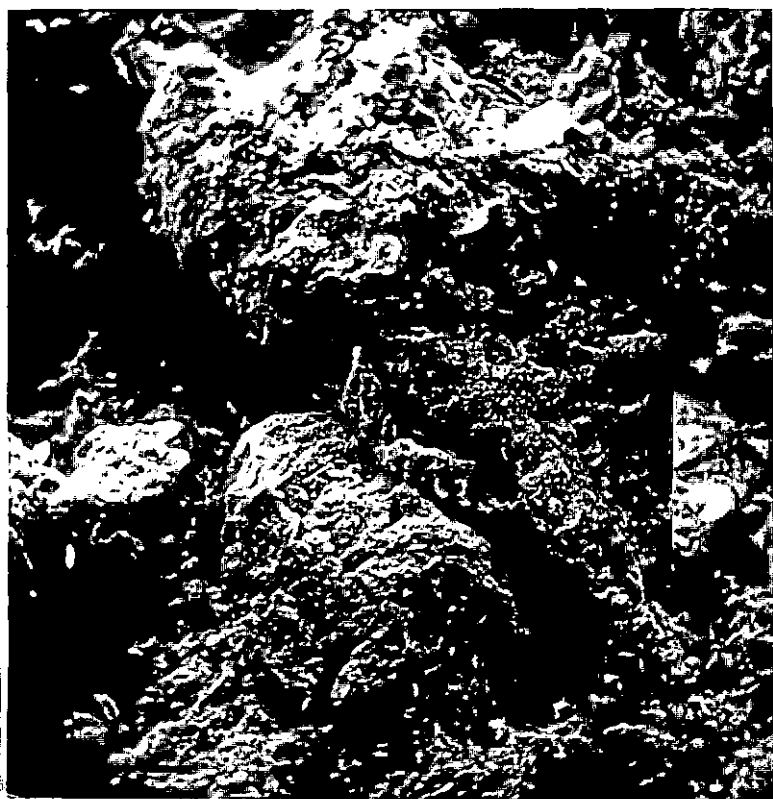
$$\gamma_s = 1,550 \text{ g/cm}^3$$

$$k = 5,02 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

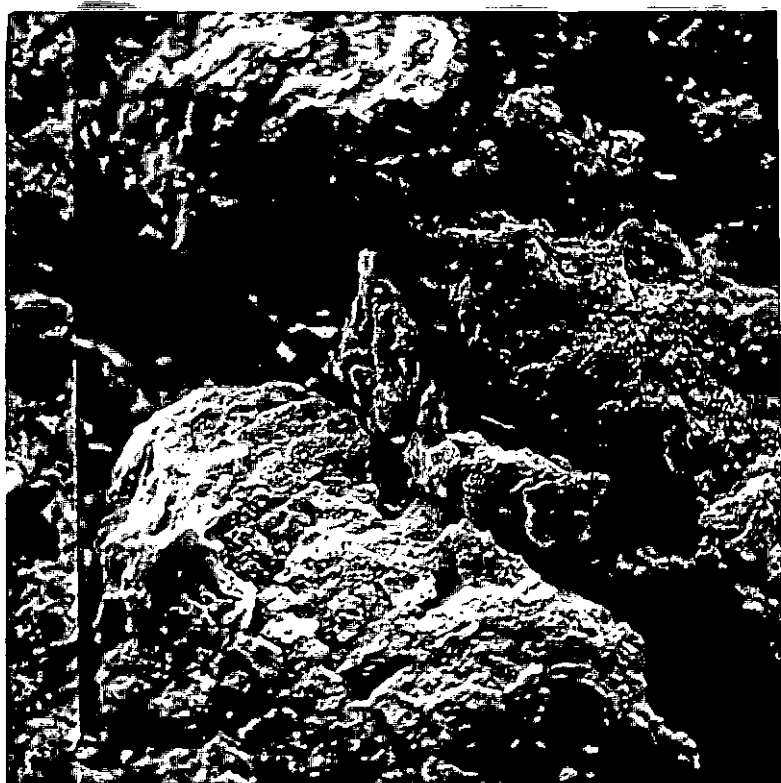
- a) b) e c) Partículas de areia fina totalmente recobertas por aglomerados de partículas menores que foram cimentadas pela cal. A sequência de fotos detalha o contato entre as partículas.
- d) Foto onde se vê o arranjo das partículas de argila. As partículas nesta unidade de moldagem estão ainda bastante floculadas.

Número	Angulo de Observação	Aumento	Escala
a) 29091	15°	130X	154µm
b) 29092	15°	260X	77µm
c) 29093	15°	2600X	8µm
d) 29087	30°	6000X	3,3µm

(a)



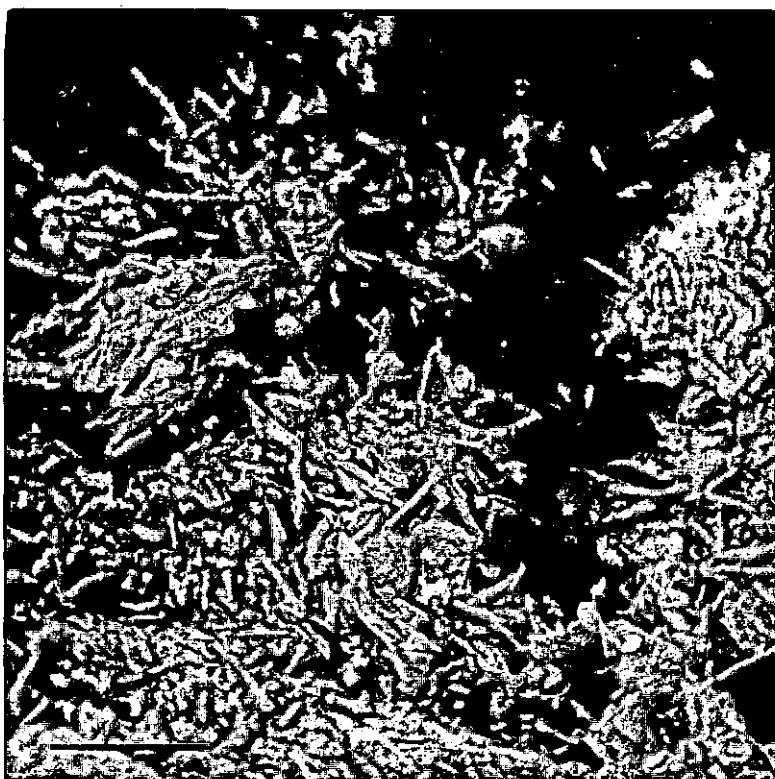
(b)



(c)



(d)



Ponto 4Solo Puro

$h = 23,28$

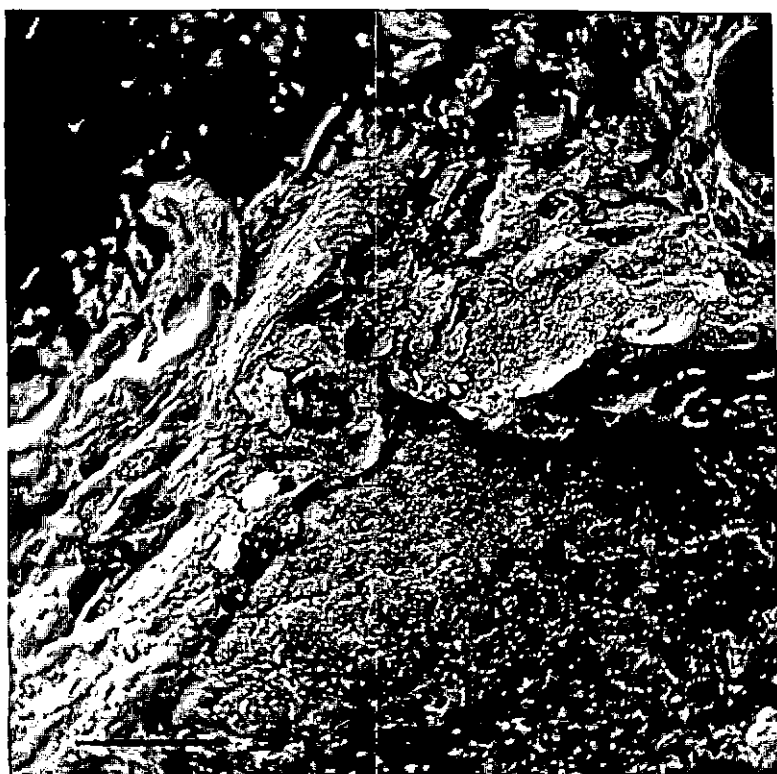
$\gamma_s = 1,566 \text{ g/cm}^3$

$k = 1,13 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

a) Esta foto evidencia a forma diferentes de cimentação que ocorre entre partículas de areia do solo puro e do solo-cal, em comparação com as fotos a) b) e c) do ponto 3 da curva de compactação de solo-cal. O tipo de cimentação apresentada na amostra de solo-cal mostra que as partículas de argila estão completamente aglutinadas o que não ocorre para a amostra de solo puro mostrada nesta foto.

Número	Angulo de Observação	Aumento	Escala
a) 28333	19°	600X	33µm

(a)



Ponto 5Solo Puro

$$h = 25,28\%$$

$$\gamma_s = 1,528 \text{ g/cm}^3$$

$$k = 1,17 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$$

- a) Partículas com dimensão de silte apresentando uma orientação bem nítida devido a compactação por amassamento e a alta umidade de moldagem. A permeabilidade nesta amostra é bem menor que as amostras do ramo seco da curva de compactação.
- b) e c) Foto onde se vê a massa argilosa com estrutura dispersa. A foto (c) é um detalhe que mostra melhor a dispersão das partículas de argila.

Número	Angulo de Observação	Aumento	Escala
a) 28689	0°	2300X	9µm
b) 28691	0°	2200X	9µm
c) 28692	0°	5750X	3,4µm

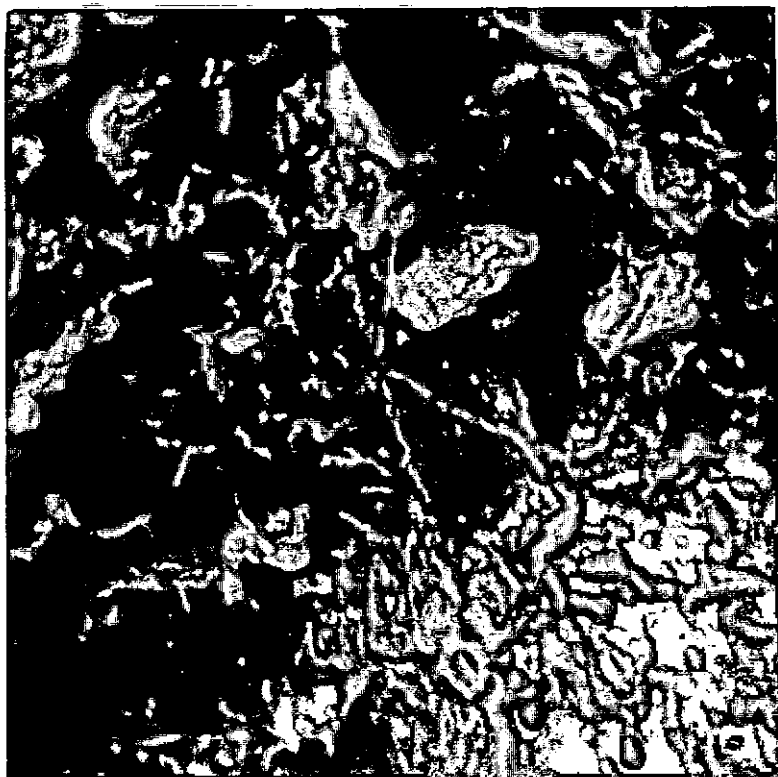
(a)



(b)



(c)



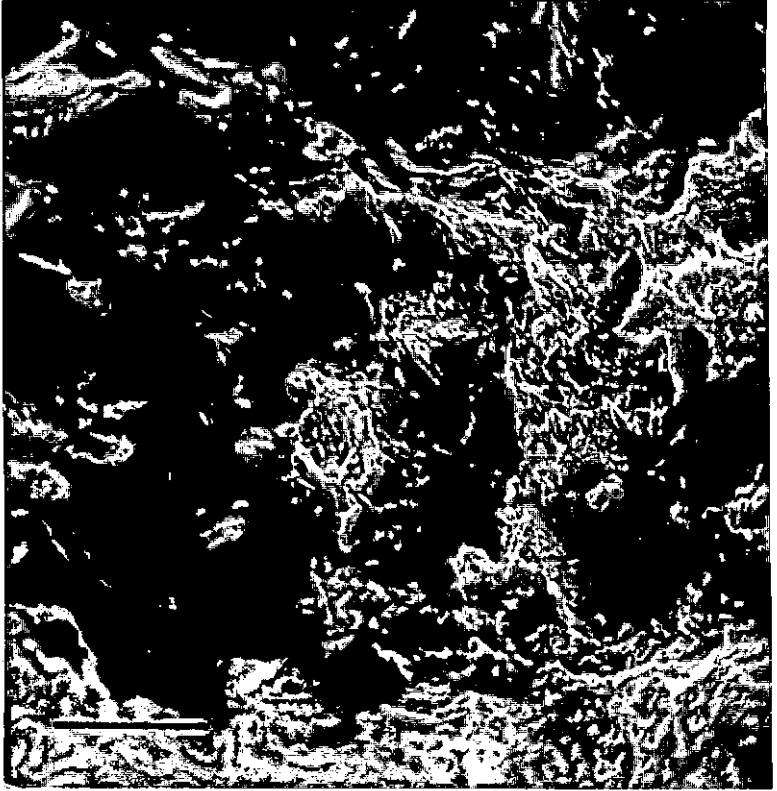
Ponto 5 solo com 3% de cal

$$h = 26,12\% \quad \gamma_s = 1,496 \text{ g/cm}^3 \quad k = 7,03 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$$

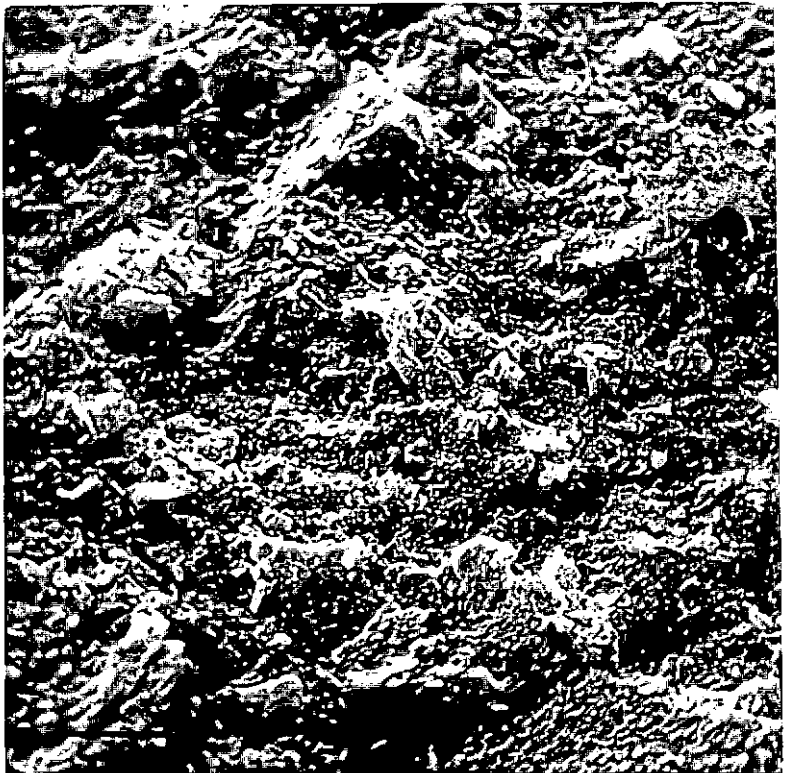
- a) Esta foto mostra partículas de argila cimentadas pela cal, que se apresentam orientadas devido a alta umidade em que foram compactadas.
- b) Aspecto geral da superfície da amostra onde se observa a cal recobrindo as partículas maiores.
- c) e d) Detalhes da foto b) onde se observa a aglutinação das partículas provocada pela cal.
- e) A foto mostra uma partícula de areia recoberta por material cimentante.
- f) Através deste detalhe da foto anterior nota-se que a cimentação é bem diferente para aquelas encontradas para solo puro.

Número	Angulo de Observação	Aumento	Escala
a) 28737	0°	2400X	8µm
b) 29077	0°	2350X	8µm
c) 29078	0°	5750X	3,4µm
d) 29079	0°	11500X	1,7µm
e) 28739	0°	240X	83µm
f) 28740	0°	600X	33µm

(a)



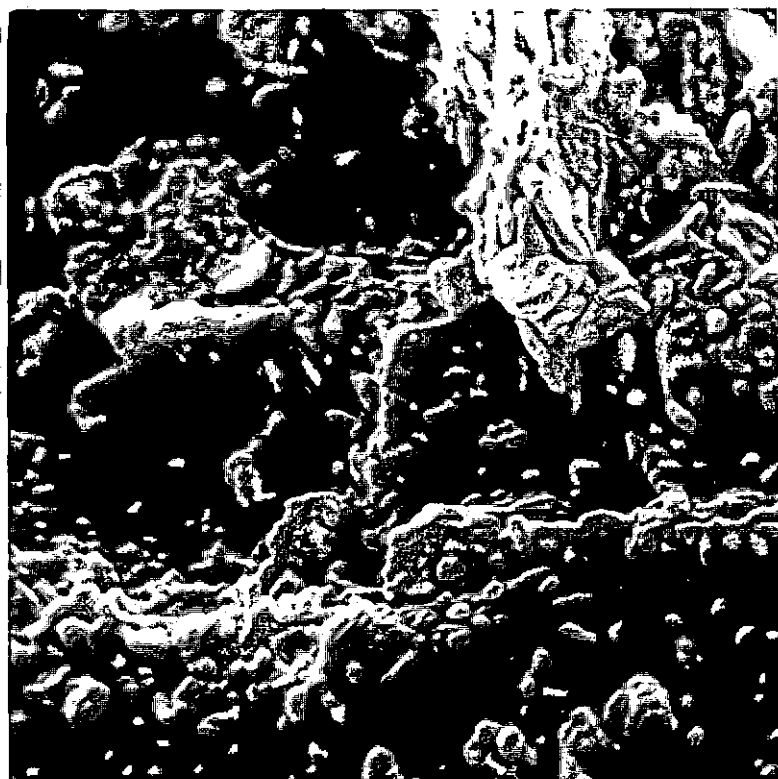
(b)



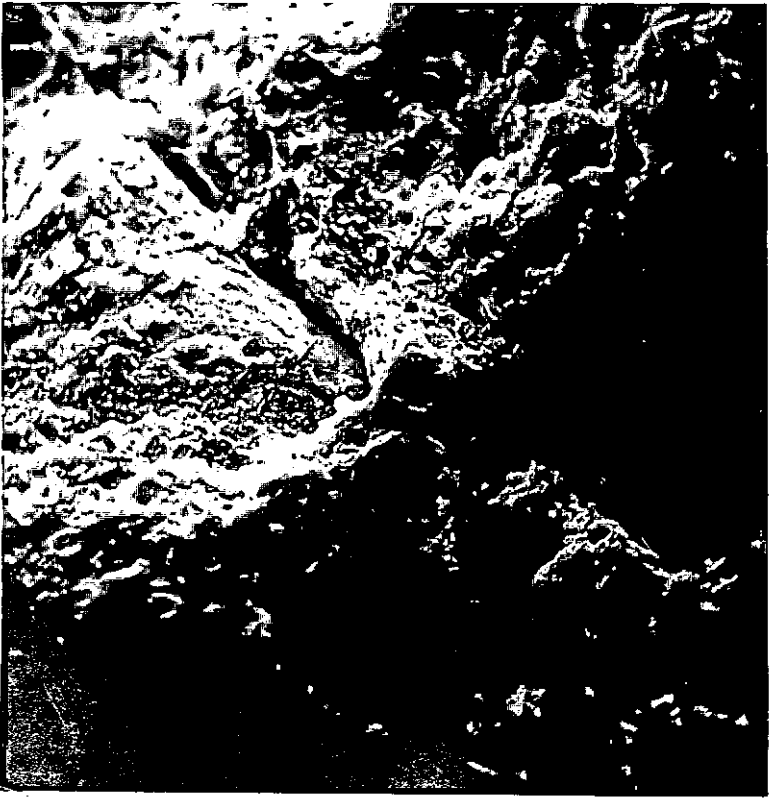
(c)



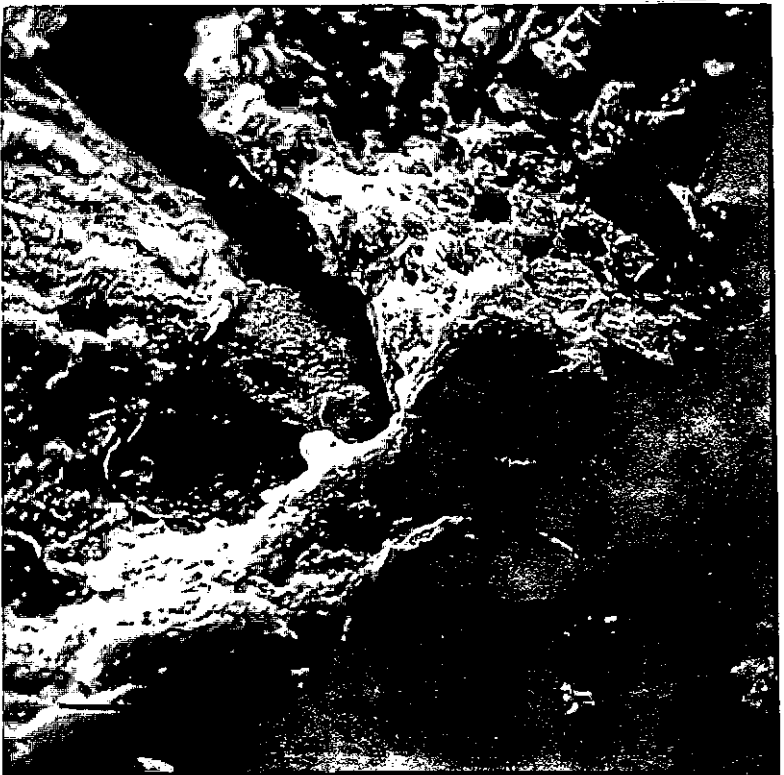
(d)



(e)



(f)



CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 Conclusões

1) O permeâmetro montado especialmente para a realização deste trabalho inspirado no esquema de Mitchell mostra ser muito conveniente na determinação de permeabilidade de solos argilosos. A repetibilidade dos ensaios é boa, e a operação do permeâmetro não apresenta grandes dificuldades. Este aparelho poderá ser normalmente utilizado na determinação de coeficientes de permeabilidades em laboratório com eficiência e precisão.

2) A variação de gradientes hidráulicos, dentro dos limites estudados (de 80 a 600) não alterou o valor do coeficiente de permeabilidade do solo utilizado, pois os erros inerentes ao aparelho estão na mesma ordem de grandeza que os devidos a variação de gradiente, sendo ambos pequenos.

3) O solo estudado teve um aumento de permeabilidade quando estabilizado com cal. O aumento foi mais marcante no ramo úmido da curva de compactação, onde a permeabilidade das amostras de solo puro são bem mais baixas, o que acentua a diferença de coeficientes de permeabilidade entre as amostras de solo puro e solo-cal.

4) A alteração de estrutura que a cal proporciona ao solo, dada pela floculação, é responsável pelo aumento da

permeabilidade e ocorre logo no início da cura. Com o aumento do tempo de cura as alterações na permeabilidade serão pequenas em relação às do início da cura.

5) No caso do solo estudado a permeabilidade do solo tratado com 3% de cal foi de 100 vezes maior que o coeficiente de permeabilidade de amostras de solo puro, comparando-se amostras com mesmo peso específico aparente seco e mesma unidade de compactação.

7.2 Sugestões

Para maior aproveitamento do permeâmetro, poder-se-á montar uma nova célula que permita ensaiar amostras indeformadas. A figura 40 mostra um esquema de célula que poderá ser construída e testada no permeâmetro.

A permeabilidade de solo-cal deve ser estudada também em outros tipos de solos argilosos, diferentes do aqui analisado, para se ter uma avaliação mais ampla do comportamento das misturas solo-cal quanto à esta característica. Entre os solos a serem estudados poderia-se dar importância aos sedimentares orgânicos moles de baixada, pois a cal deve alterar muito sua permeabilidade.

Com o aparecimento de estacas de solo-cal faz-se necessário estudar permeabilidade destas estacas que, além de proporcionarem um aumento de resistência do solo, funcionam também como drenos verticais. O estudo da permeabilidade de solo-cal compactado terá que ser comparado ao do solo-cal das estacas, pois estas são obtidas por um revolvimento mecânico do solo e da cal dentro da própria estaca.

O estudo de permeabilidade das estacas poderia ser feito "in situ" pela dificuldade de se obter em laboratório um modelo que representa as condições de campo, ou pela obtenção de amostras indeformadas em estaca de cal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- TAYLOR, D.W., (1969) "Fundamentos de la Mecanica de Suelos" Compañia Editorial Continental S.A. México. 4ª edição.
- CEDERGREN, H.R., (1967) - "Seepage, Drainage, and Flow Nets", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- LAMBE, T.W., (1954) - "The Permeability of Fine-Grained Soils" Symposium on Permeability of Soils, ASTM nº 163, pp 56-67.
- SEED, H.B. e CHAN, C.H., (1959) - "Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays", Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol 85, nº SM5, pp 87-128.
- MITCHELL, J.K.; HOOPER, D.R., e CAMPANELLA, R.G., (1965) "The Permeability of Compacted Clay", Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 91, nº SM4, pp 41-65.
- OLSEN, H.W., (1960) - "Hydraulic Flow Through Saturated Clays" Clays and Clay Minerals, Vol. 9, Proceedings of the Ninth National Conference on Clays and Clay Minerals pp 131-161.
- MITCHELL, J.K., e YOUNGER, J.S. (1967) - "Abnormalities in Hydraulic Flow Through Fine-Grained Soils", Permeability and Capillarity of Soils, ASTM, STP 417, AM. SOC. Testing Mats., pp. 106-139.
- PINTO, S., (1972) - "Ensaio de Permeabilidade em Amostras de Solos", Publicação DNER.

- BURMISTER, D.M., (1954) - "Principles of Permeability Testing of Soils", Symposium on Permeability of Soils, ASTM, nº 163, pp 3-26.
- HANSHO, S. (1973) - "Influence of Mobile Particles in Soft Clay on Permeability", Internacional Symposium on Soil Structure, Gothenburg Proceedings.
- ALVARENGA, M.M., (1974) - "Estruturas de Solos - Métodos de Observação", Tese M.Sc. - COPPE-UFRJ.
- RÉMY, J.P., (1973) - "The Measurement of Small Permeabilities in the Laboratory", The Institution of Civil Engineers - London 1973.
- LAMBE, T.W., (1951) - "Soil-Testing for Engineers", John Wiley New York.
- HERRIN, M., e MITCHELL, H., (1961) - "Lime-Soil Mixtures", Highway Research Board Bulletin 304.
- HARTY, J.R., e THOMPSON, M.R., (1973) - "Lime Reativity of Tropical and Subtropical Soils", Highway Research Record, nº 442.
- LUND, O.L. e RAMSEY, W.J., (1959) - "Experimental Lime Stabilization in Nebraska", Highway Research Board Bulletin nº 231.
- CASTRO, E., (1969) - "Estudos Relativos a Estabilização de Solos com Cal", Instituto de Pesquisas Rodoviárias - Publ. nº 347.

- INGLES, O.G., e METCALF, J.B., (1972) - "Soil Stabilization Principles and Practice", Butterworths, Sydney.
- ESMER, E.; WALKER, R.D., e KREBS, R.D., (1969) "Freeze-Thaw Durability of Lime-Stabilized Clay Soils", Highway Research Record nº 263.
- BROMS, B.B., e BOMAN, P., (1977) - "Lime Columnus-A New Type of Vertical Drains". Proc. IX ICSMFE - Vol.1 - Toquio.
- ARMAN, A., e MUNFAKH, G.A., (1972) - "Lime Stabilization of Organic Soils", Highway Research Record nº 381.
- MENENDES GARCIA, J.J.J.,(1973) - "Suelos Expansivos su Estabilizacion con Cal", Tese M.Sc. COPPE-UFRJ.
- EADES, J.L., e GRIN, R.E., (1960) - "Reaction of Hidrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization", Highway Research Board,Bulletin 262.
- JAN, M.A., e WALKER, R.D., (1963) - "Effet of Lime, Moisture and Compaction on a Clay Soil", Highway Research Record nº 29.
- MITCHELL, J.K., e HOOPER, D.R., (1961) - "Influence of Time Between Mixing and Compaction on Properties of Lime-Stabilized Expansive Clay", Highway Research Board, Bulletin 304.
- MC-DOWELL, C., (1959) - "Stabilization of Soils with Lime, Lime-Flyash, and other Lime Reactive Materials", Highway Research Board, Bulletin 231.
- "State of the Art: Lime Stabilization-Reatins, Properties Design, Construction", Prepared by Transportation Research

Board, Committee on Lime and Lime-Fly Ash Stabilization-Number 180-September 1976.

- BOYTON, R.S., (1970) - "Experiência de Estabilização de Solos com Cal nos Estados Unidos", Conferência Internacional sobre Cal, em Salzburg, Austria - Nota Técnica, nº 49 - Associação Brasileira dos Produtores de Cal - São Paulo, 1971.
- GUIMARÃES, J.E.P., (1971) - "Estabilização de Solos - Nova e Importante Aplicação de Cal seus Conceitos e suas Vantagens", Boletim nº 1 - Associação Brasileira dos Produtores de Cal.
- GUTSCHICK, A.K., (1958) - "Construções expeditas com Estabilização à Base de Cal" - Tradução do Engº J. Eptácio P. Guimarães - Publicado na Revista Modern-Highway, Junho 1958.
- EADES, J.L., e GRIM, R.E., (1966) - "A quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization", Highway Research Record, nº 139.

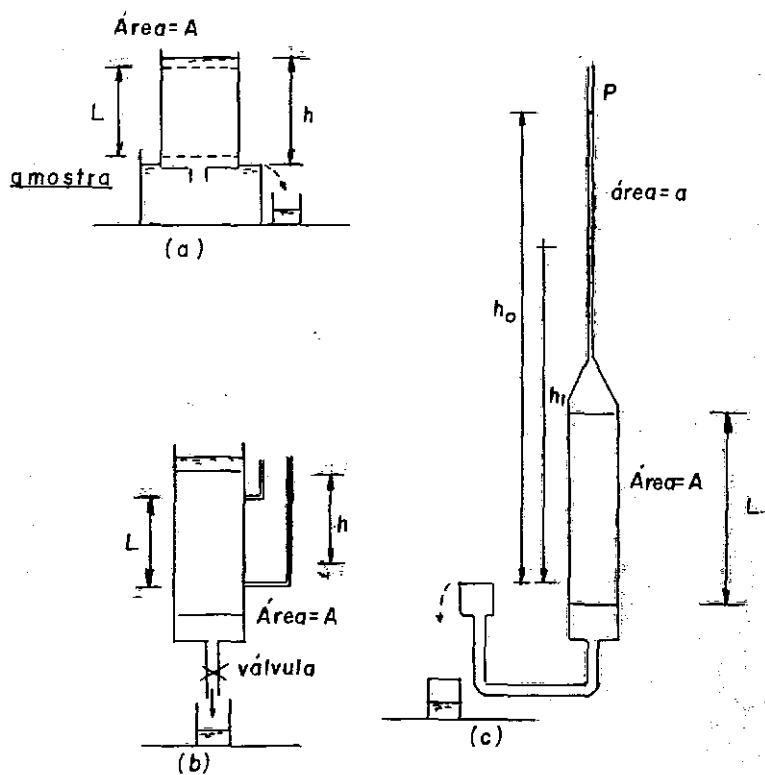


FIG. 2 - (a) e (b) - Permeômetro de carga constante.

(c) - Permeômetro de carga variável.

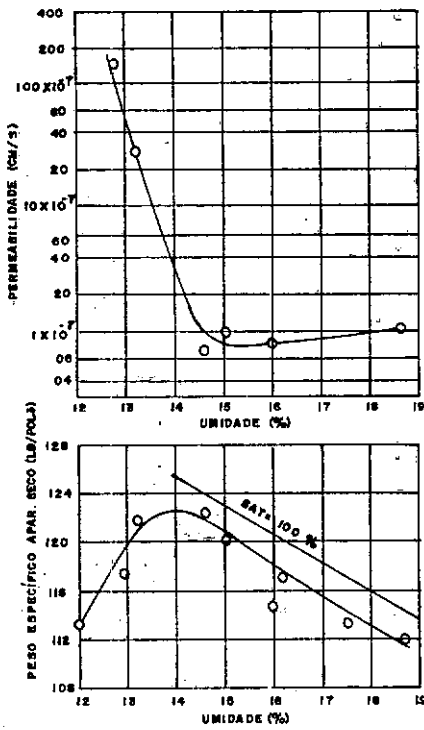
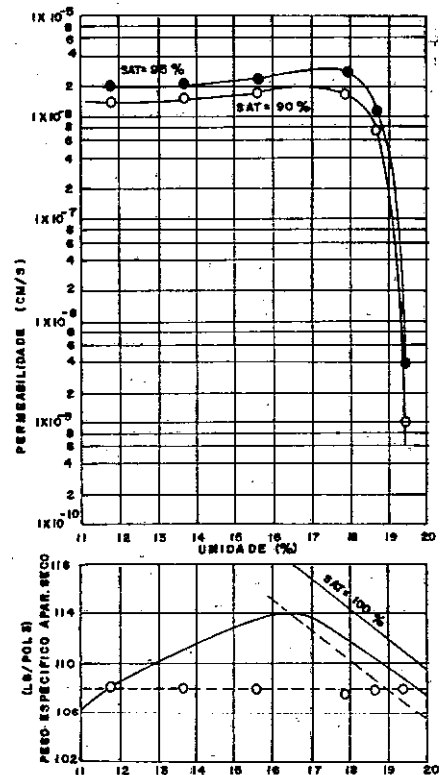


FIG. 3 - Compactação - Permeabilidade
(Lambe em Mitchell - 1965)

FIG. 4 - Permeabilidade em função da umidade para amostras de argila siltosa preparadas com peso espec. constante.
(Mitchell - 1965)



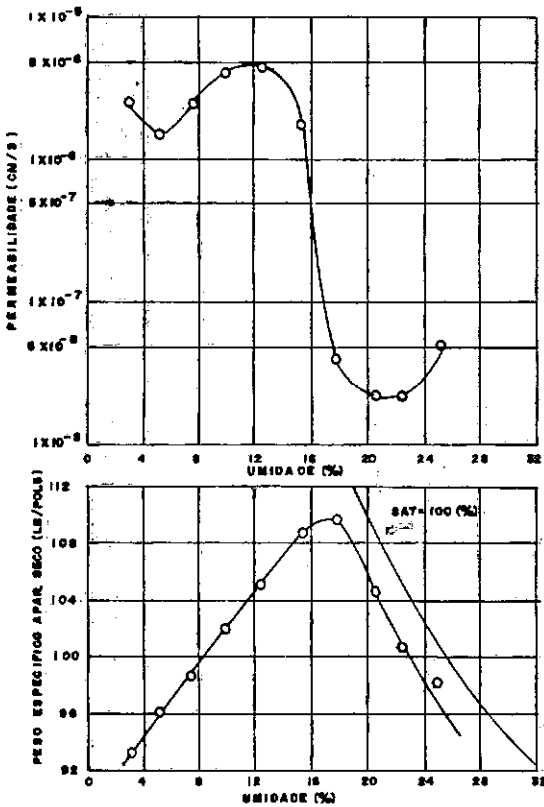
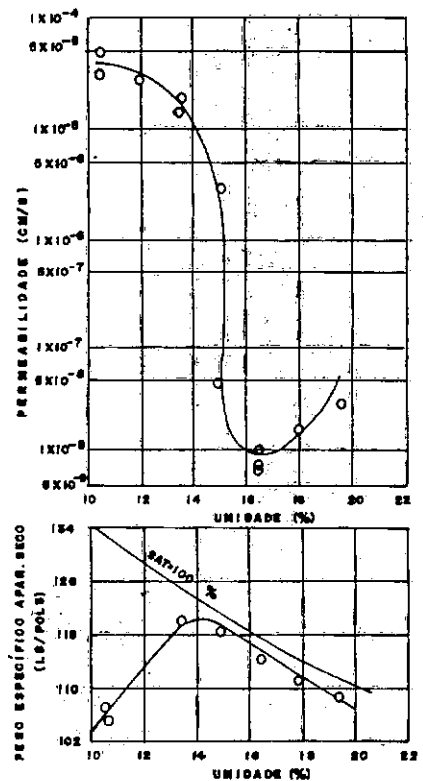


FIG. 5 — Permeabilidade x Umidade amostras de argila siltosa — compactação amassamento (Mitchell - 1965)

FIG. 6 — Permeabilidade x Umidade amostras da AASHO ROAD TESTE — compactação amassamento. (Mitchell - 1965)



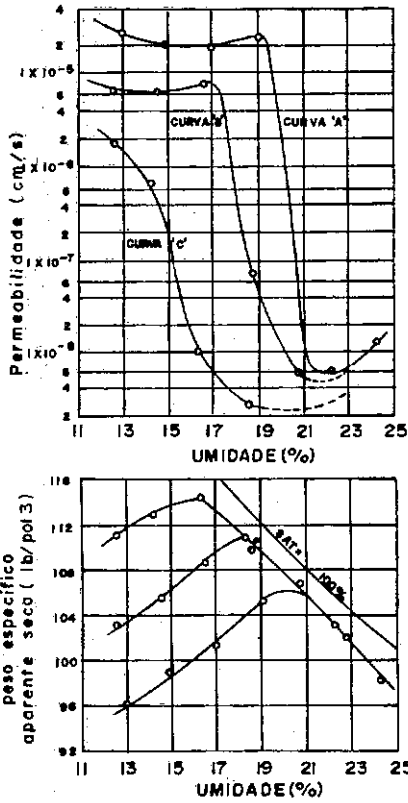
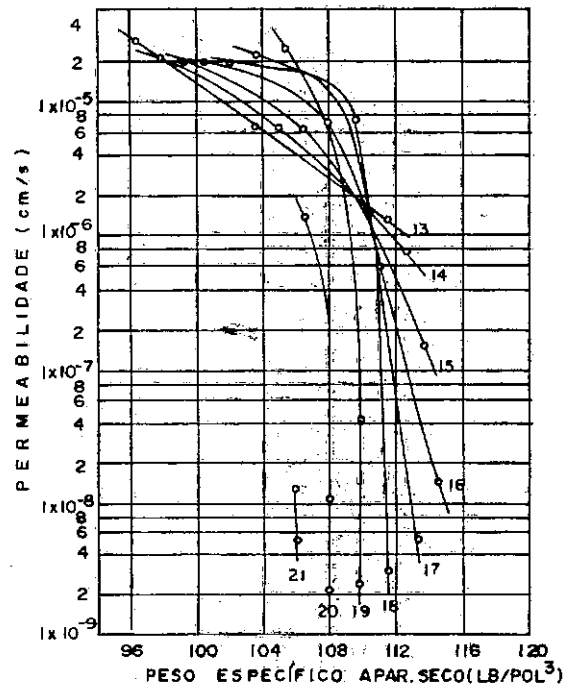


FIG. 7 - Permeabilidade de amostras de argila siltosa preparadas com tres energias de compactação. (Mitchell - 1965)

FIG. 8 - Permeabilidade em função do peso esp. aparente seco para umidades constantes de amostras preparadas por amassamento. (Mitchell - 1965)



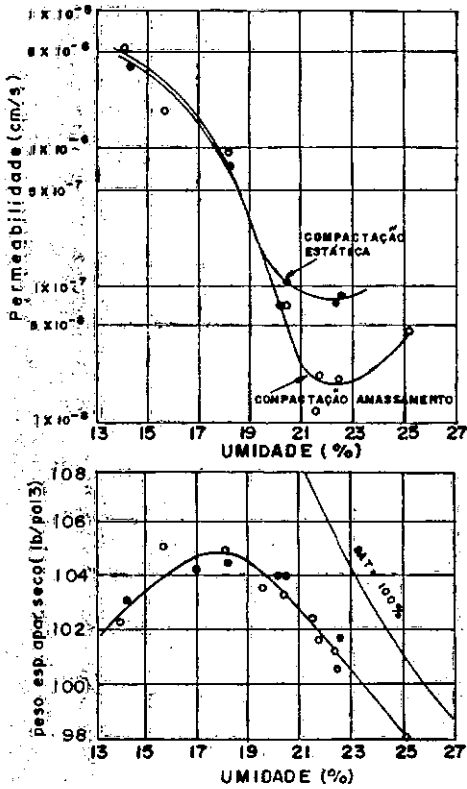
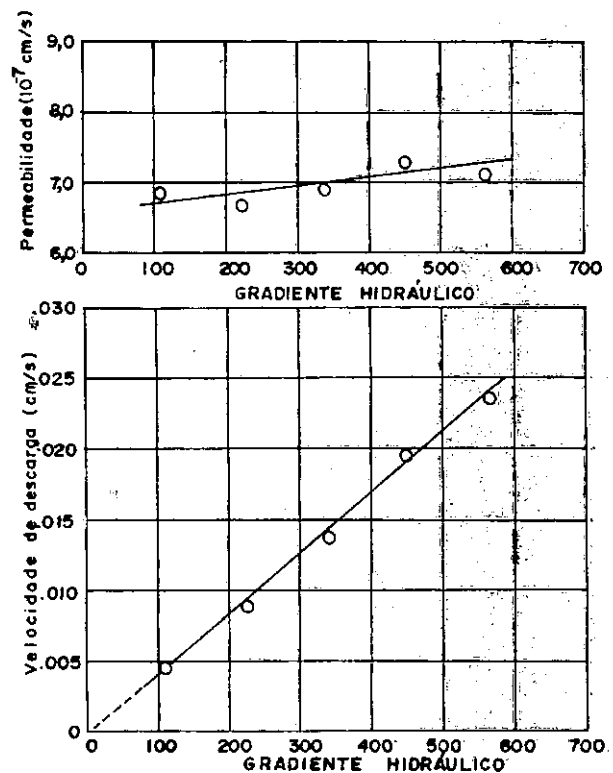


FIG. 9 - Influência do método de compactação na permeabilidade. (Mitchell - 1965)

FIG. 10 - Velocidade de descarga e Permeabilidade em função do Gradiente Hidráulico. (Hooper em Mitchell - 1967)



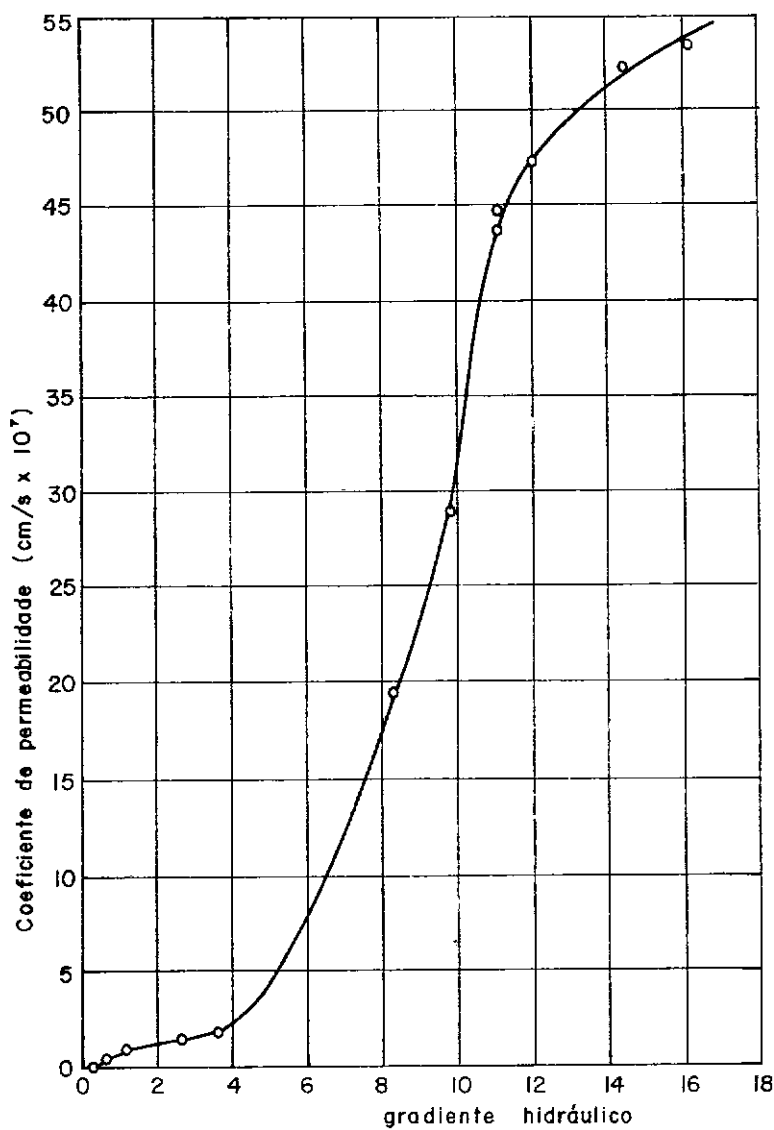


FIG. II - Variação do coeficiente de permeabilidade com gradiente hidráulico. (Hooper em Mitchell, 1967)

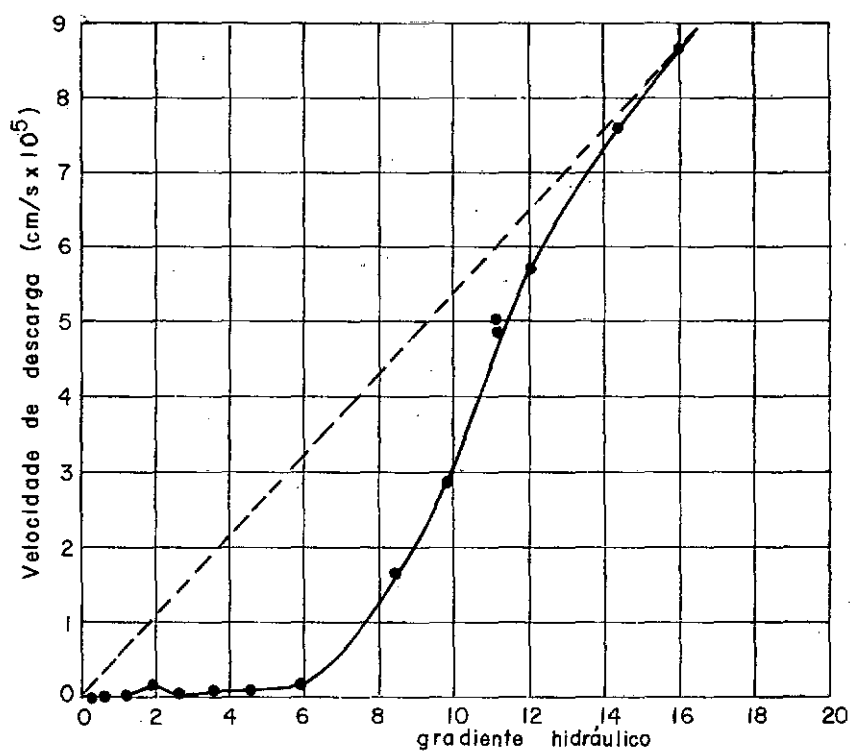
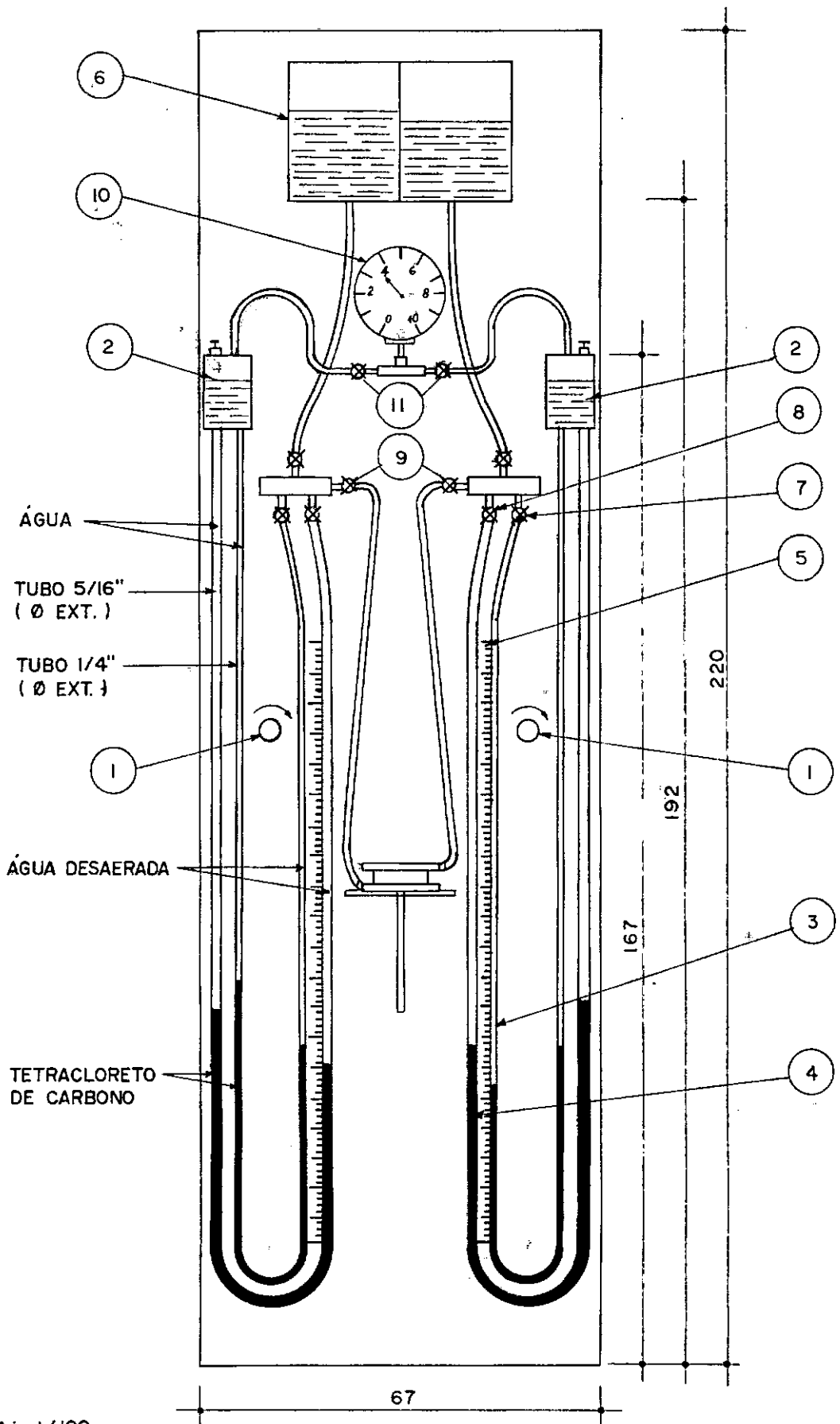


FIG. 12 - Velocidade de descarga x Gradiente hidráulico
(Hooper em Mitchell - 1967)

FIG.13 - Permeâmetro tipo MITCHELL



ÍNDICE DA FIGURA (13)

- 1- Válvulas reguladoras de pressão
- 2- Reservatórios de água
- 3- Tubo de Nylon diâmetro externo de 1/4"
- 4- Tubo de Nylon diâmetro externo de 5/16"
- 5- Escalas
- 6- Reservatório de recarregamento
- 7- 8- 9- Válvulas
- 10-Manômetro
- 11-Válvulas do Manômetro

FIG. 14 - CÉLULA DE PERMEABILIDADE

ESC. 1:1

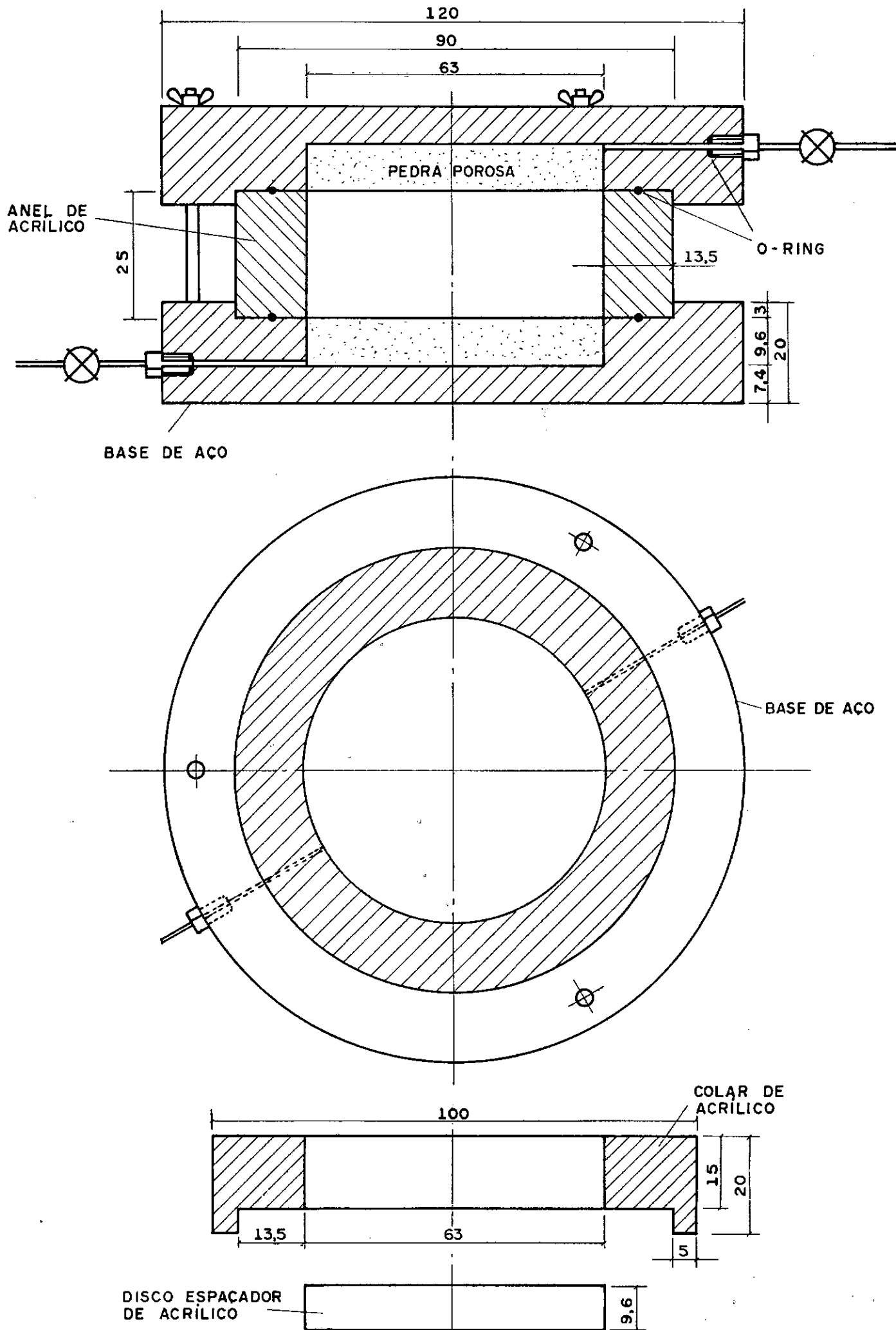


FIG. 15 - ENSAIO DE PERMEABILIDADE
(com uso de pressão)

Registro: PONTO 2	Amostra: k.25 DUTRA
% cal: 3%	Data: 10/11/78

Anel nº	1	Compactação	
Área do anel (cm ²)	31,17	Tipo:	AMASSA.
Volume do anel (cm ³)	77,93	Golpes /camada	25
Peso do anel (g)	93,35	Nº camadas	5
Peso do anel + solo úmido (g)	235,09	Peso do pistão	17 kgf
Peso do solo úmido - P _h (g)	141,74	Altura de queda	-
M. esp. ap. do solo úmido - $\gamma_h = P_h / V$ (g/cm ³)	1,819		
M. esp. ap. do solo seco - $\gamma_s = \gamma_h / 1 + h$ (g/cm ³)	1,511	Pressão de saturação	
M. esp. real dos grãos de solo - γ_g (g/cm ³)	2,70	Pressão:	4,00
Altura da amostra - L (cm)	2,5	Contra pressão	4,00
Índice de vazios - $e = \gamma_g / \gamma_s - 1$	0,787		

Umidade	Inicial		Final	
Cápsula nº	528	759	826	804
Solo úmido + cápsula (g)	36,32	38,16	50,43	42,15
Solo seco + cápsula (g)	32,42	33,86	42,06	35,72
Cápsula (g)	13,26	12,62	12,87	13,31
Água (g)	3,90	4,30	8,37	6,43
Solo seco (g)	19,16	21,24	29,19	22,41
Umidade (%)	20,35	20,24	28,67	28,69
Umidade média (%)	20,30		28,68	
Gráu saturação - $S = h \times \gamma_g / e \cdot \gamma_a$	69,64		98,39	

Tubo 1: F₁ =Tubo 2: F₂ =

$K_T = Q/A \cdot l/t \cdot L/h$	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6
Leit. inicial - L ₀	2,5	2,8	3,2	2,8	3,1	3,1
Leit. final - L _F	62,7	63,3	65,0	63,9	63,7	62,8
$Q = (L_F - L_0) F_i$ (cm ³)	11,26	11,31	11,56	11,43	11,33	11,16
Pressão (kg/cm ²)	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20	4,20
Contra pressão (kg/cm ²)	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Pressão resultante (kg/cm ²)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Carga - h (cm)	200	200	200	200	200	200
Tempo (minutos)	1m 5s	1m 6,6s	1m 1,3s	1m 7,3s	1m 3,7s	1m 4,6s
Tempo (s)	65s	66,6s	61,3s	67,3s	63,7s	64,6s
Coef. perm. - K _T (cm/s)	6,94x10 ⁻⁵	6,81x10 ⁻⁵	7,56x10 ⁻⁵	6,81x10 ⁻⁵	7,13x10 ⁻⁵	6,93x10 ⁻⁵
Temperatura - T (°C)	22,9	22,5	22,3	22,5	23,0	23,0
Coef. viscosidade - C _v	0,932	0,941	0,946	0,941	0,930	0,930
K ₂₀ = K _T · C _v (cm/s)	6,47x10 ⁻⁵	6,41x10 ⁻⁵	7,15x10 ⁻⁵	6,41x10 ⁻⁵	6,63x10 ⁻⁵	6,44x10 ⁻⁵

Coef. perm. médio à 20°C - K ₂₀ médio	6,59 x 10 ⁻⁵	$\sigma = 0,29 \times 10^{-5}$	cv = 4,4%
--	-------------------------	--------------------------------	-----------

COPPE/UFRJ

programa de engenharia civil
área: mecânica dos solos

PROJETO COPPETEC Nº

INTERESSADO:

REFERÊNCIA:

Visto:	Coord. do projeto:	Verificação:	Data:	Desenho nº
--------	--------------------	--------------	-------	------------

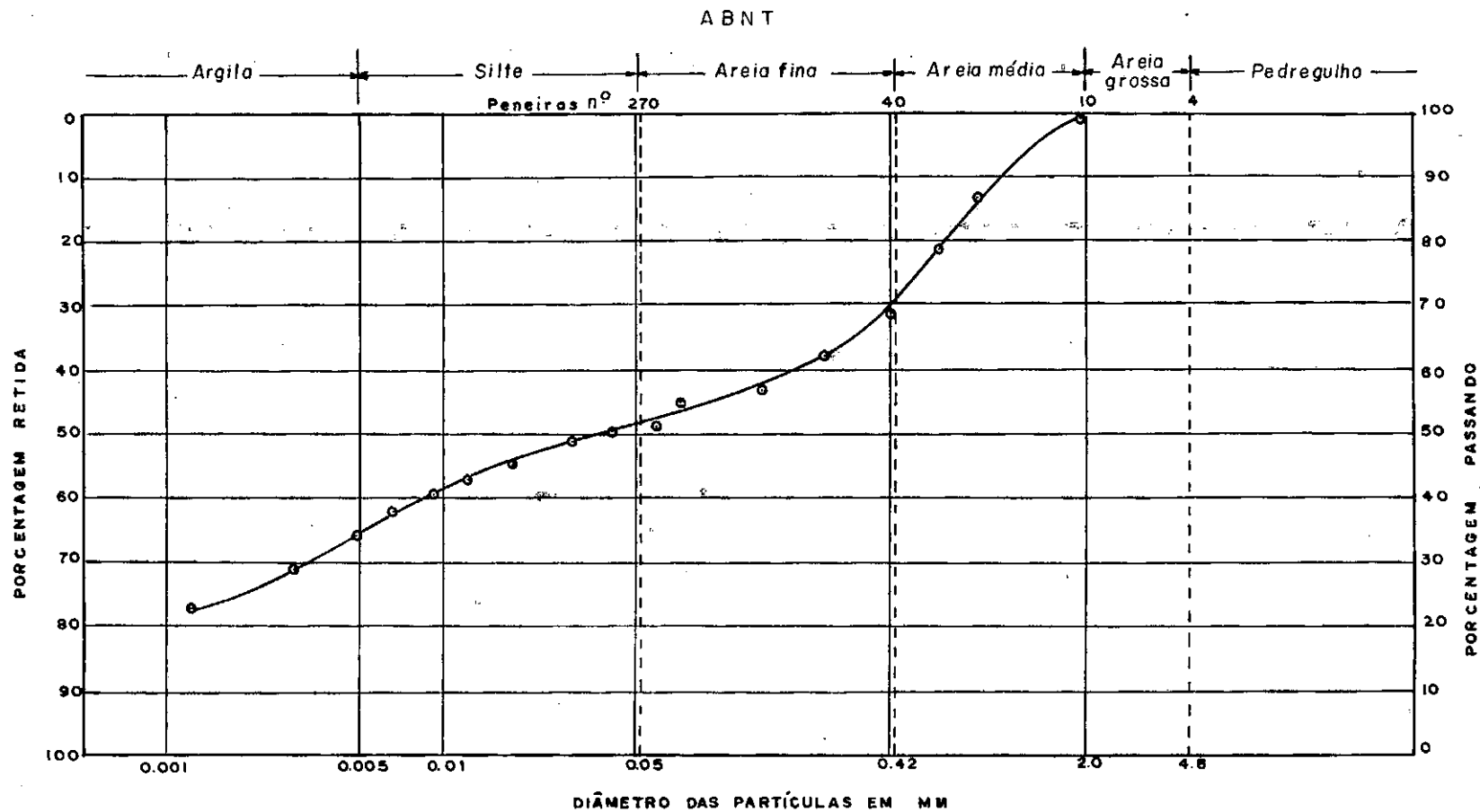


FIG. 16 - CURVA GRANULOMÉTRICA - SOLO PURO

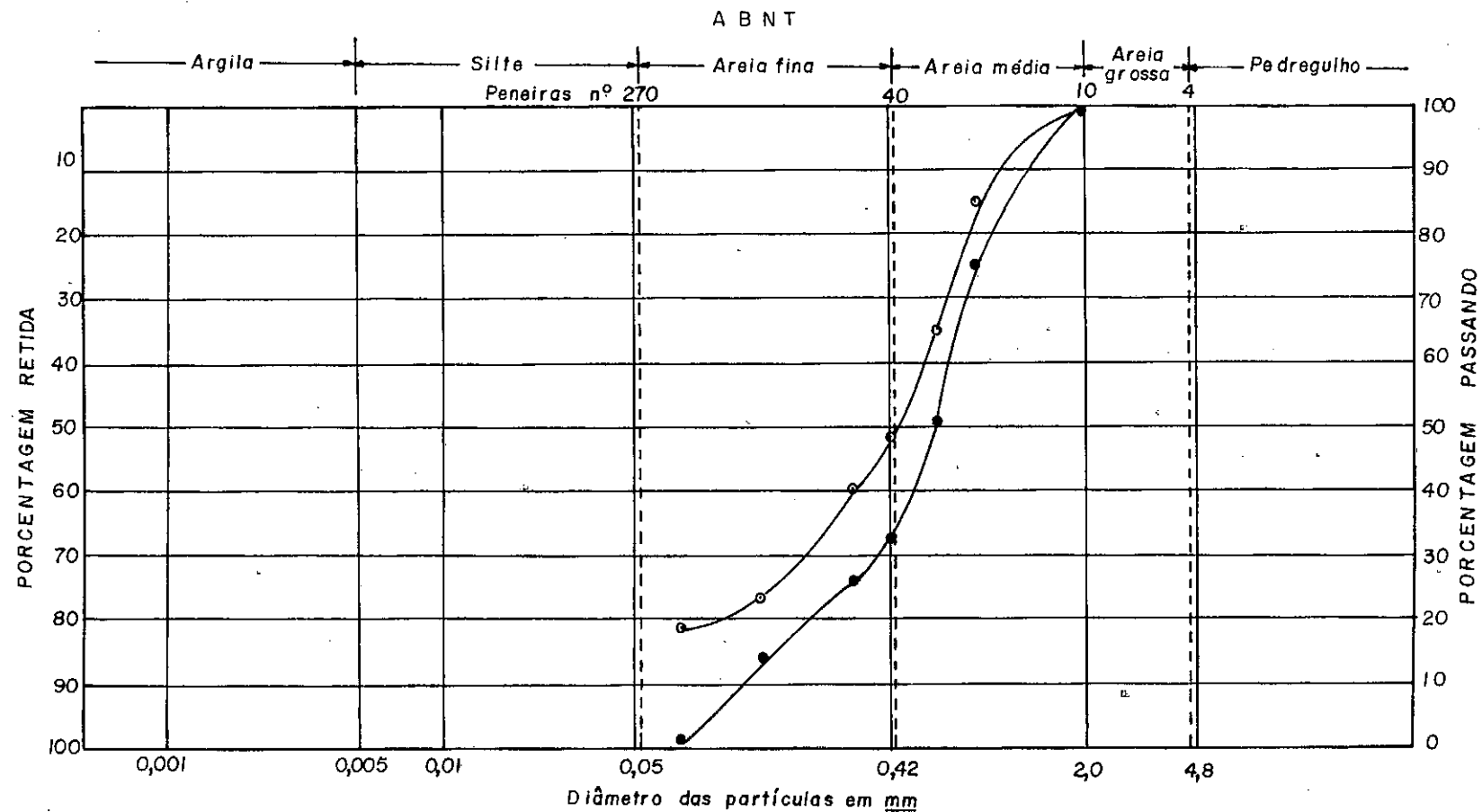


FIG. 17 - Peneiramento não lavado.

- - solo puro
- - solo com 3% de cal.

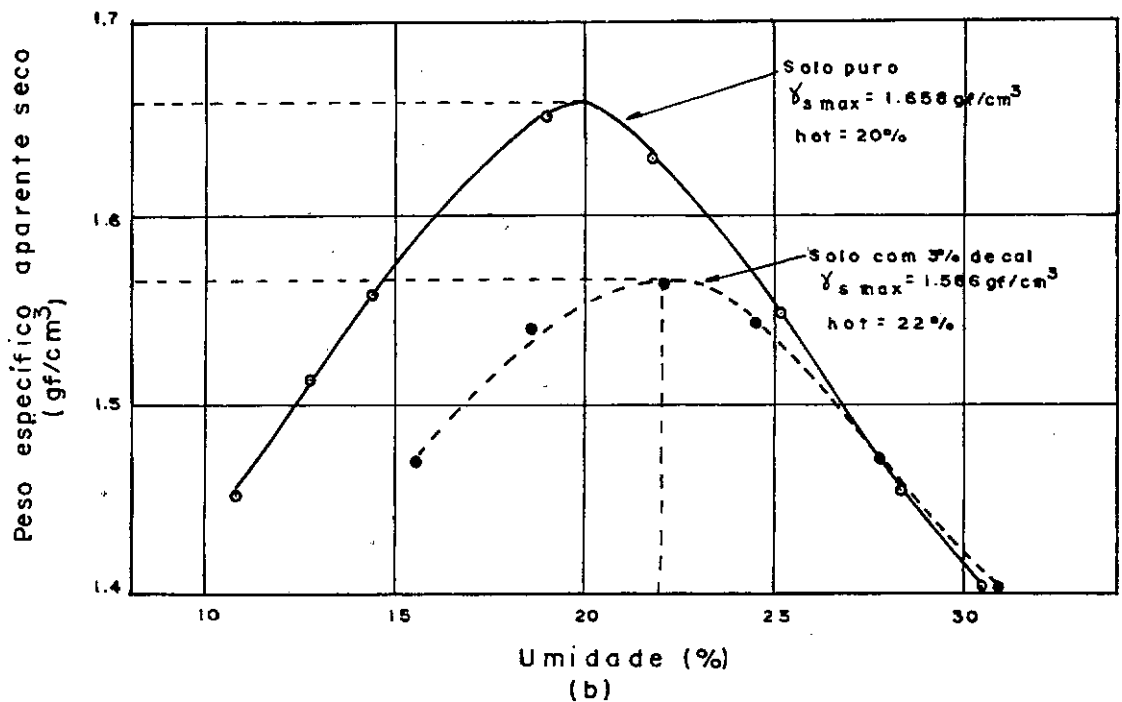
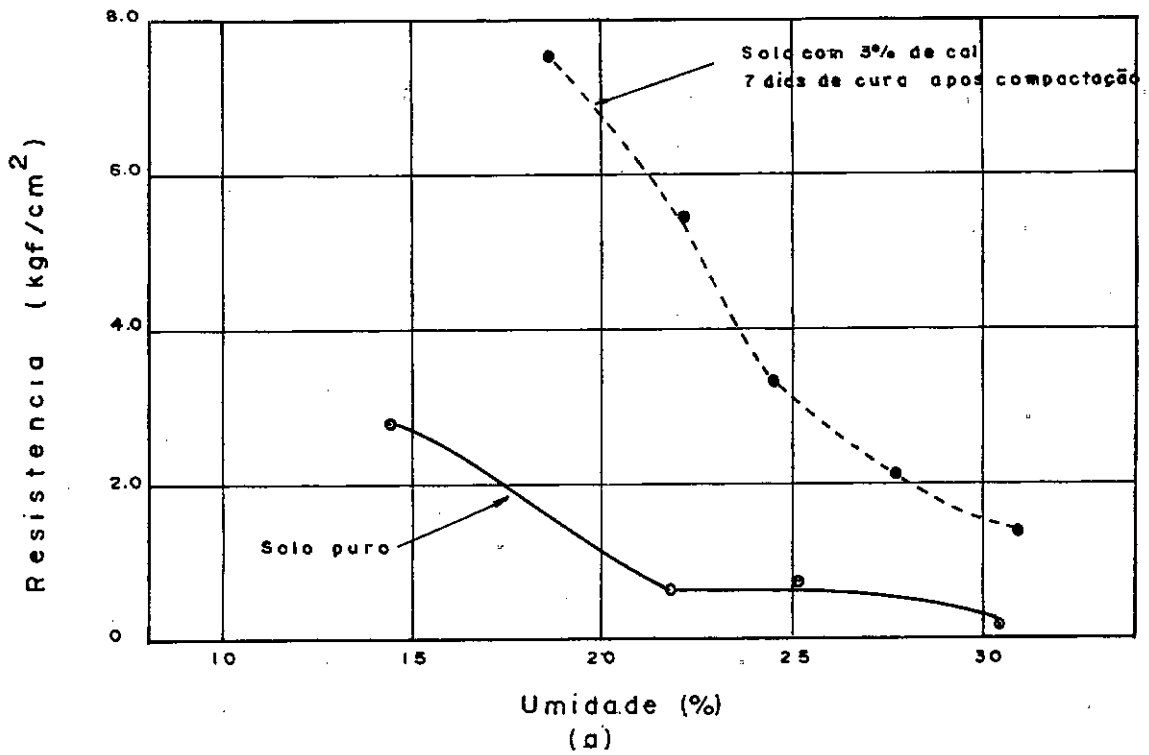


FIG. 18 (a) Resistência a compressão simples "versus" umidade

(b) Compactação Proctor Normal - 12 golpes

5 camadas

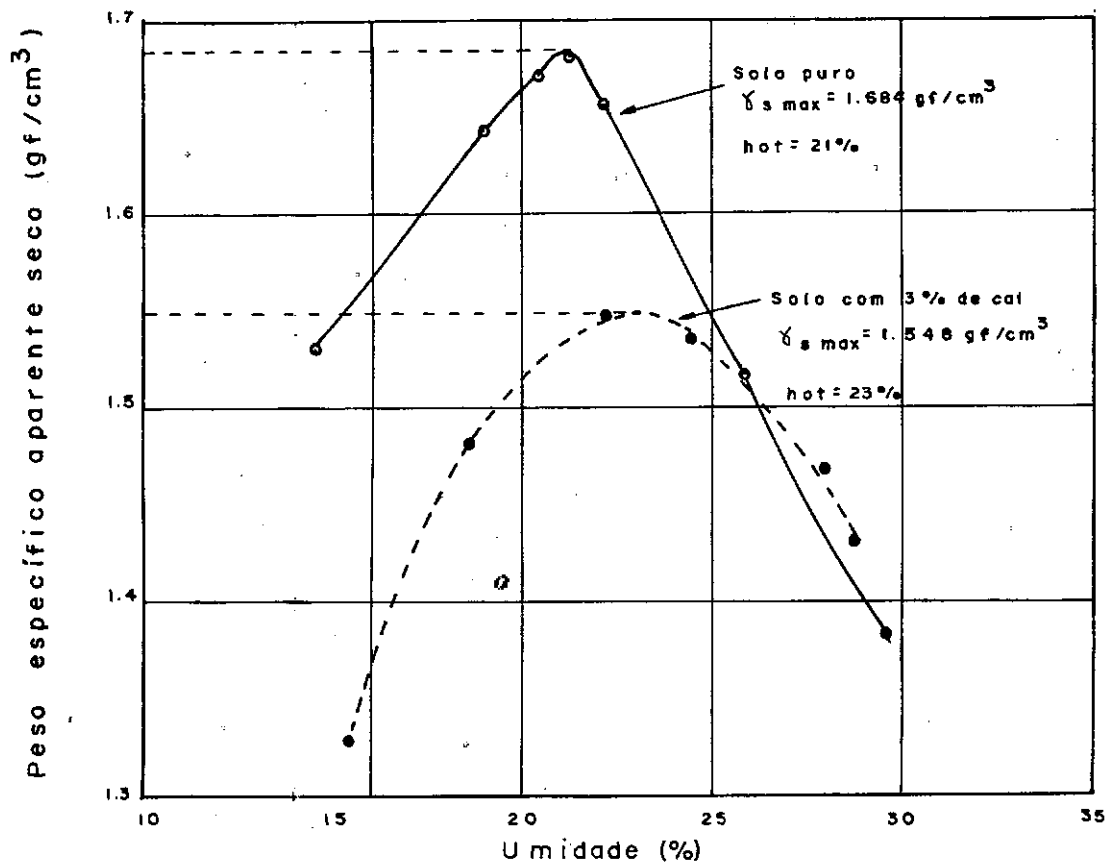


FIG.19 - Compactação Harvard - 12 aplicações (17 kgf)
5 camadas

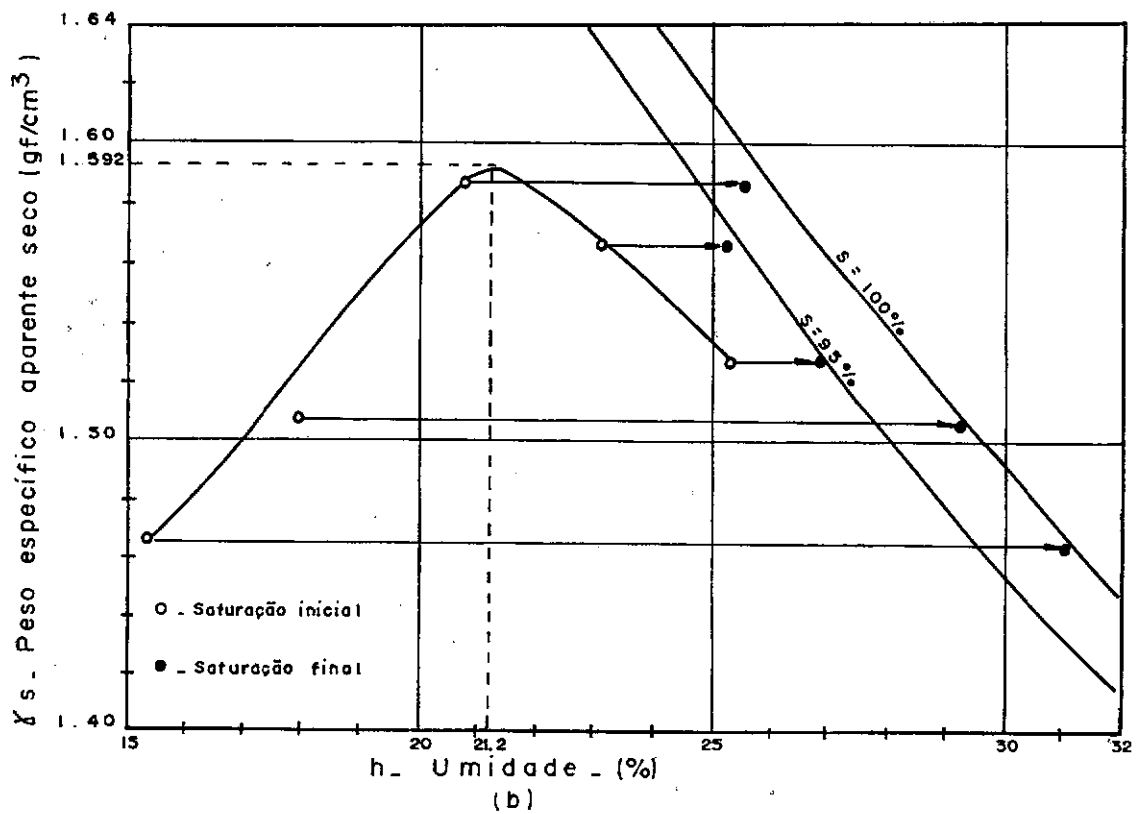
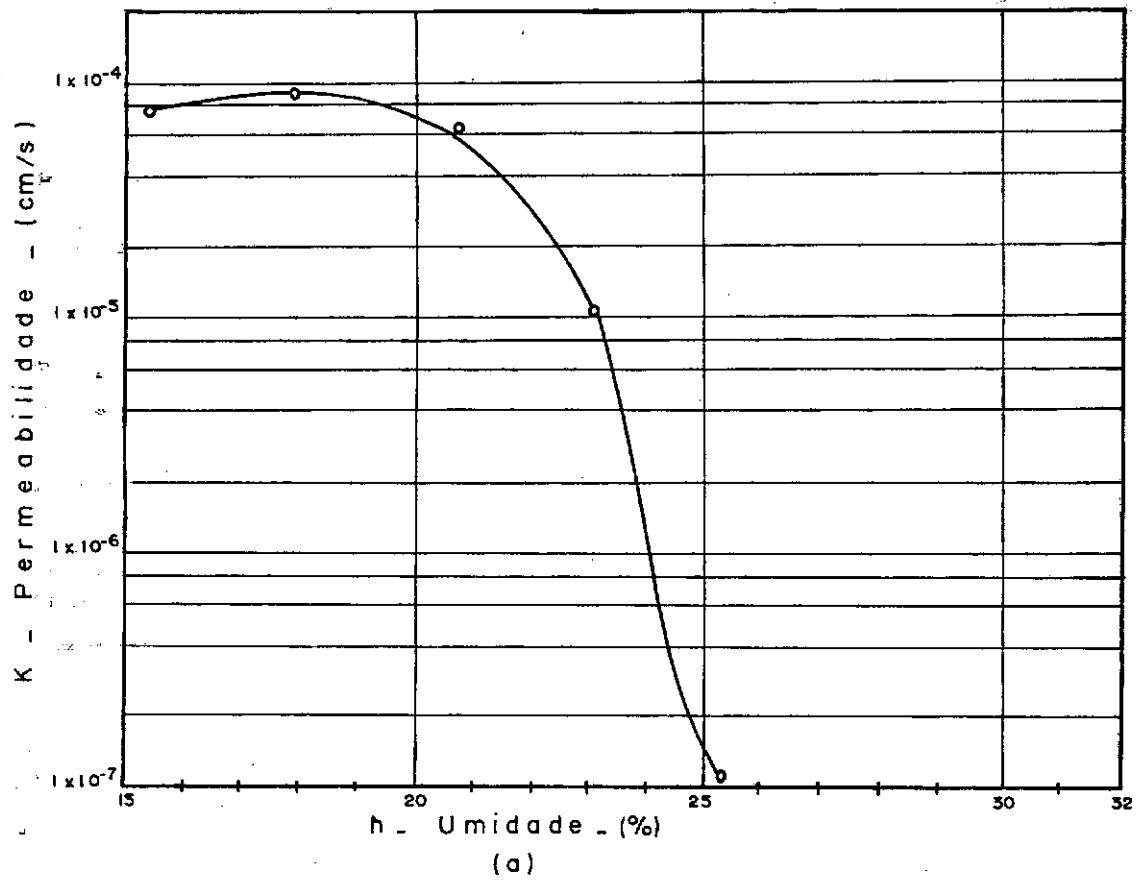


FIG. 20 - (a) - Permeabilidade (K) "versus" umidade (h) - (b) - Compactação por amassamento, 15 aplicações (17 kgf), 5 camadas.

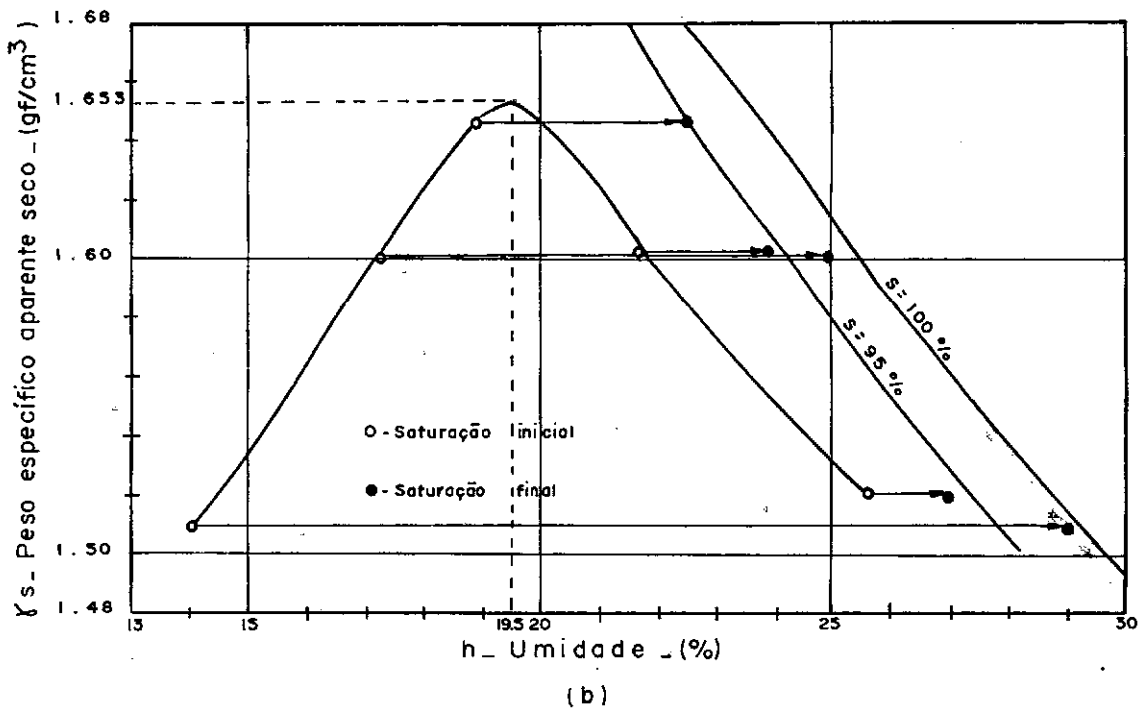
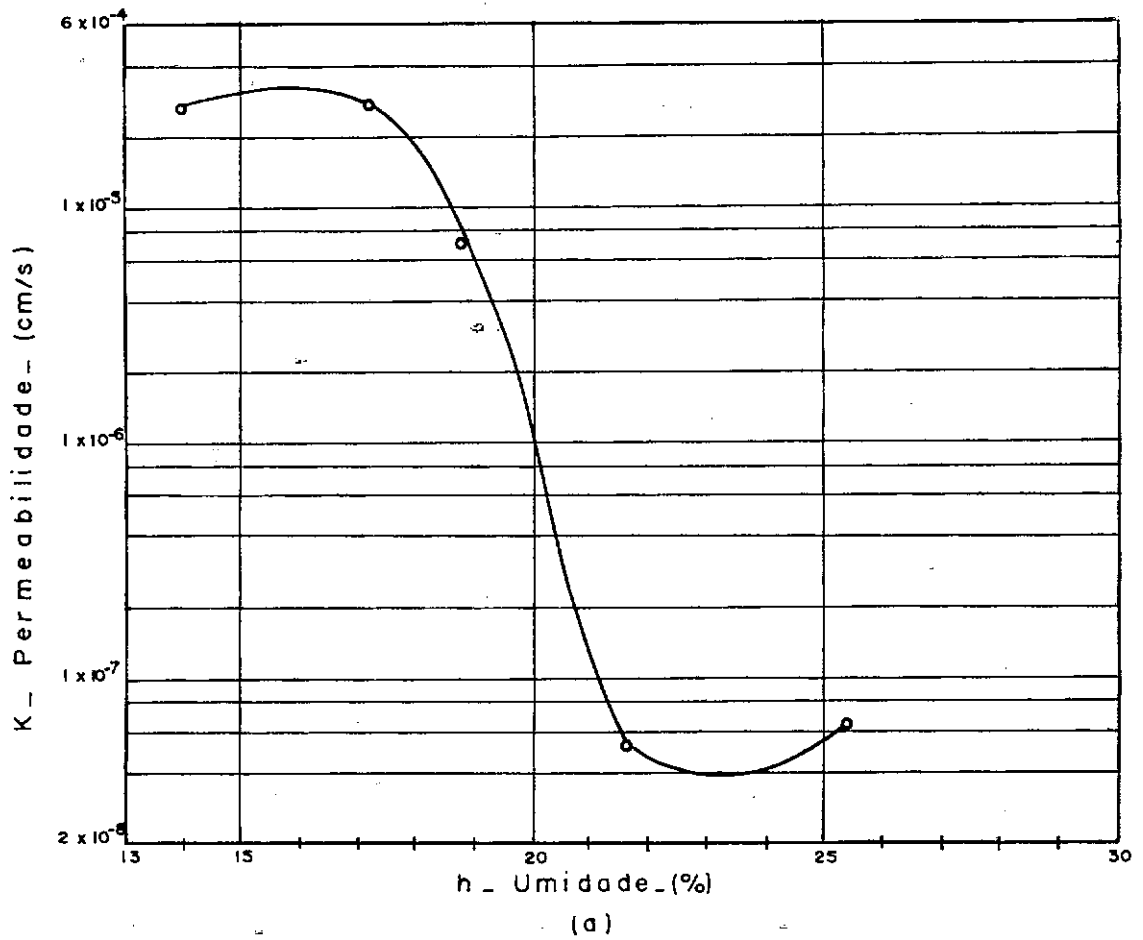


FIG. 21 - (a) - Permeabilidade (K) "versus" umidade (h) - (b) - Compactação por amassamento, 25 aplicações (17 kgf), 5 camadas. Amostras de solo puro.

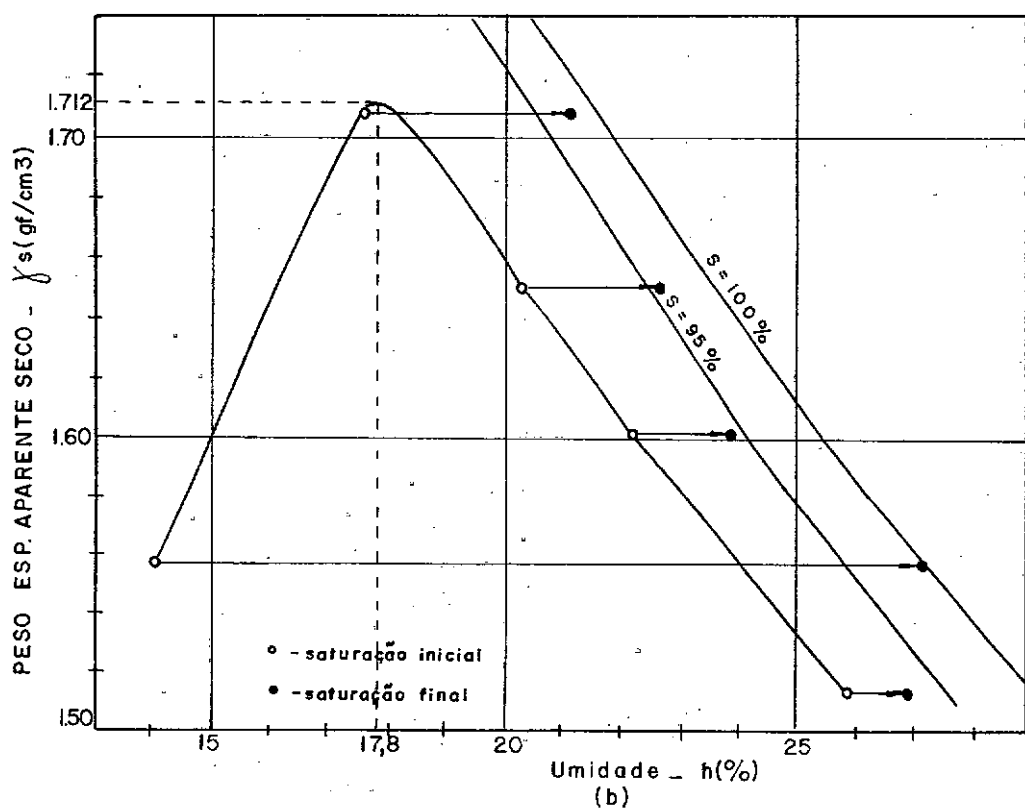
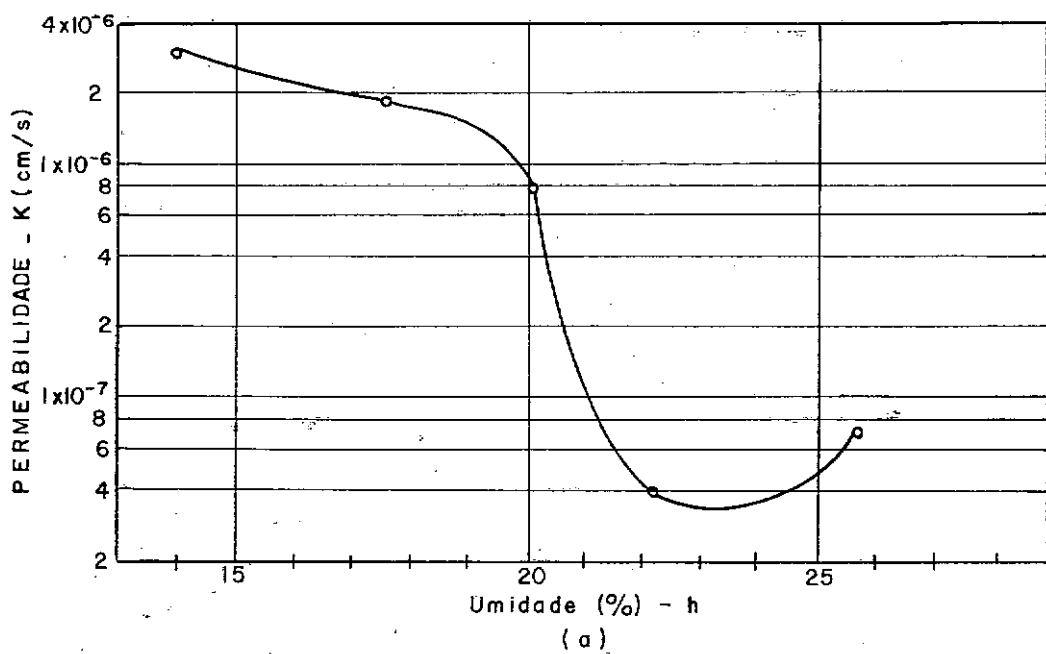


FIG. 22 - Amostras de solo puro.

a) Permeabilidade (K) x Umidade (h)

b) Compactação por amassamento, 35 aplicações (17 Kgf), 5 camadas

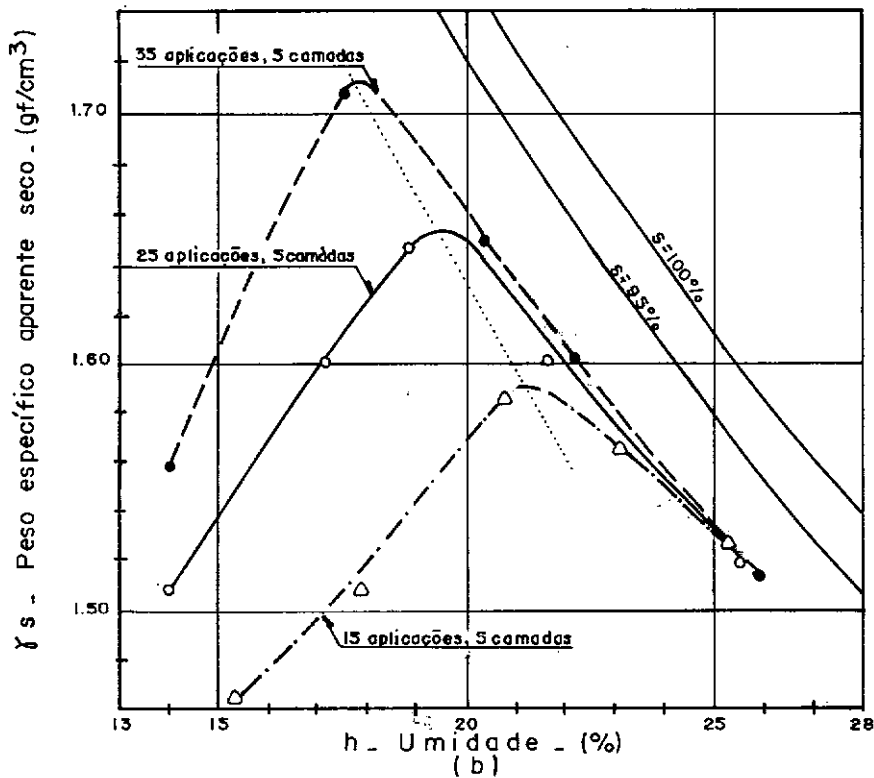
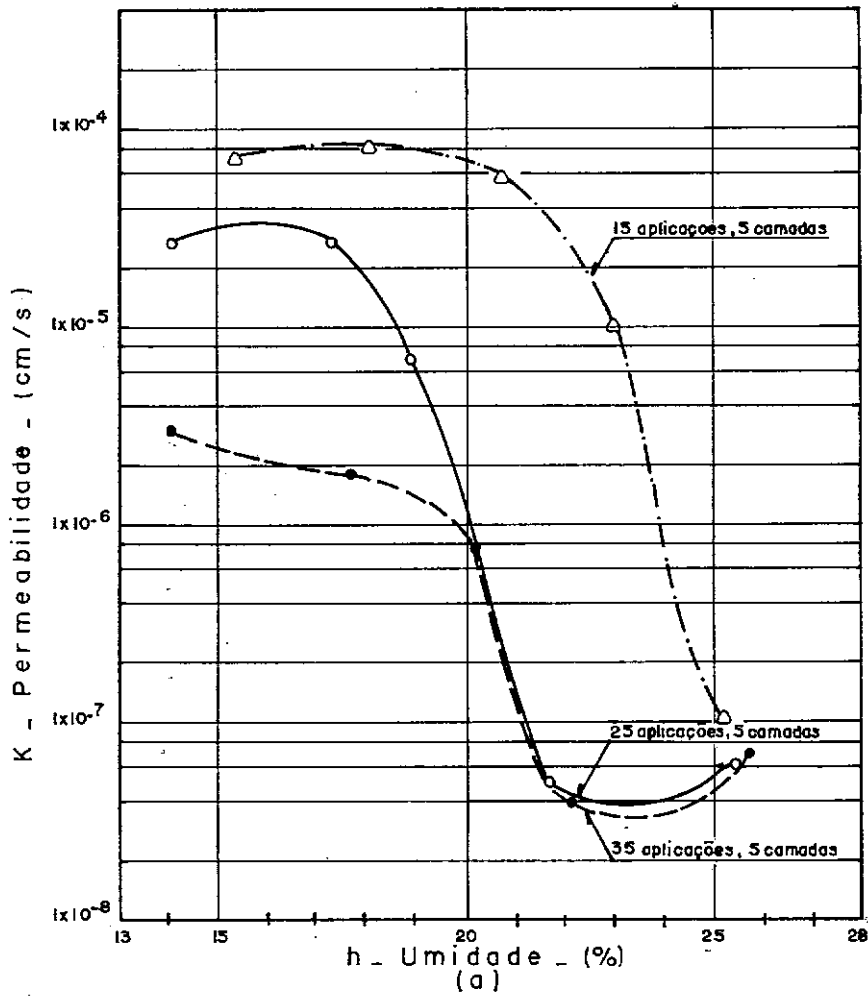


FIG.23 - (a) - Permeabilidade (K) "versus" umidade (h) - (b) - Condições de compactação para três energias. Amostras de solo puro.

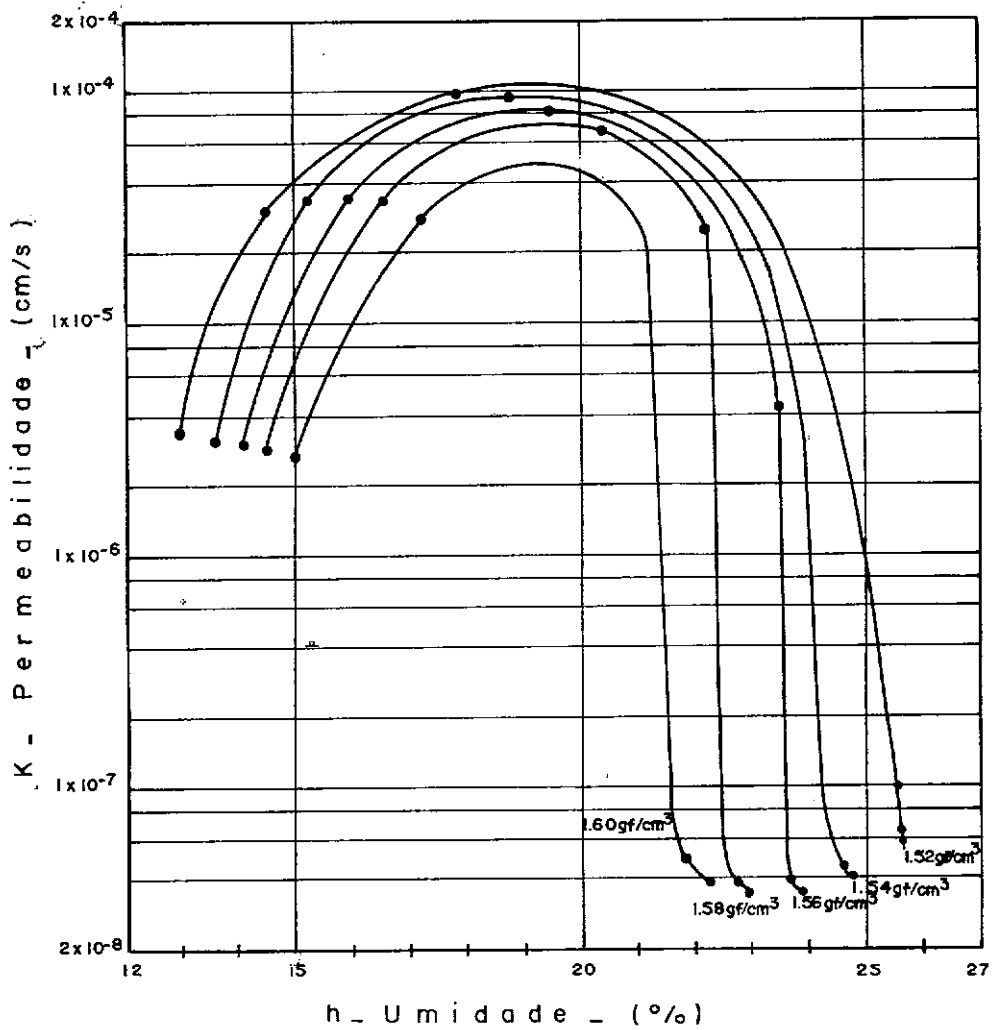


FIG. 24 - Permeabilidade (K) "versus" umidade (h) para diversos pesos específicos aparentes secos de amostras de solo puro.

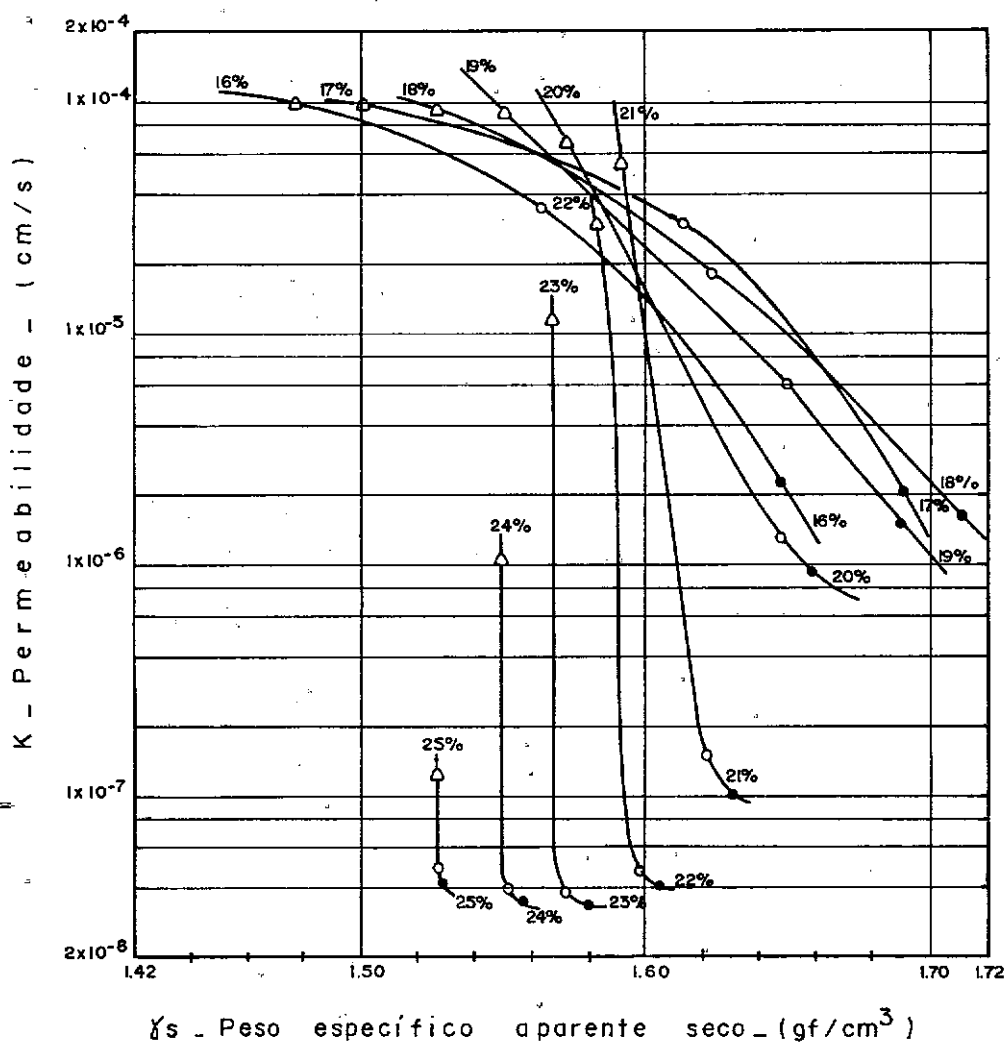


FIG.25 - Permeabilidade (K) "versus" peso específico aparente seco (γ_s) para diversas umidades de moldagem de amostras de solo puro.

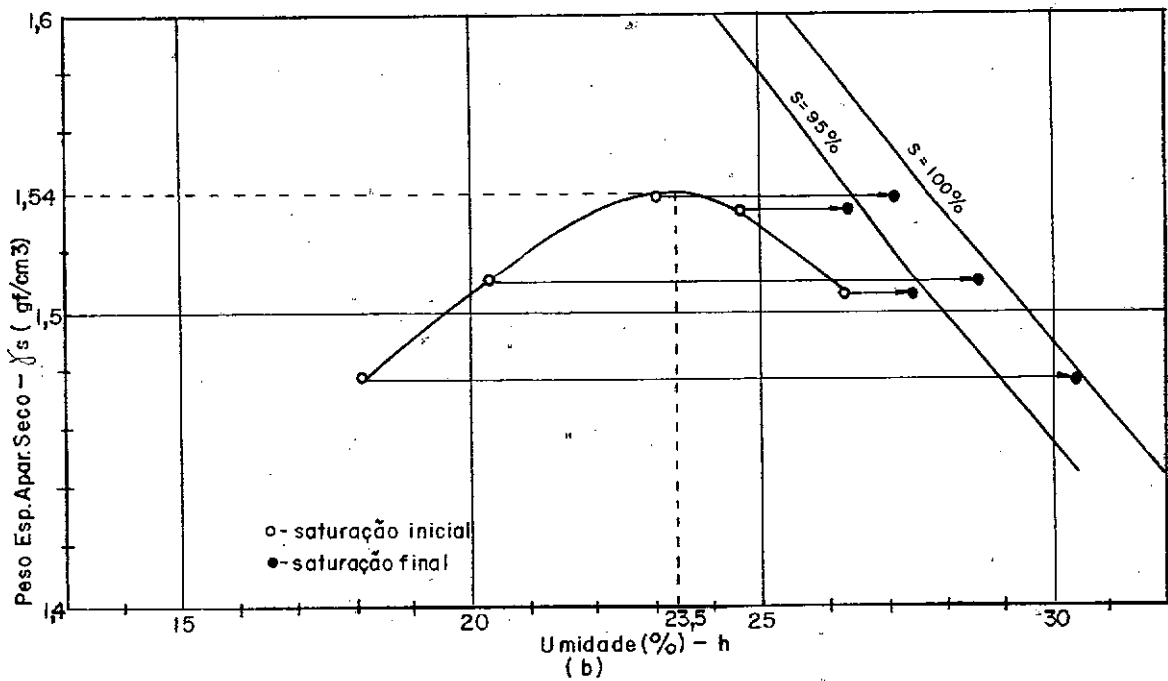
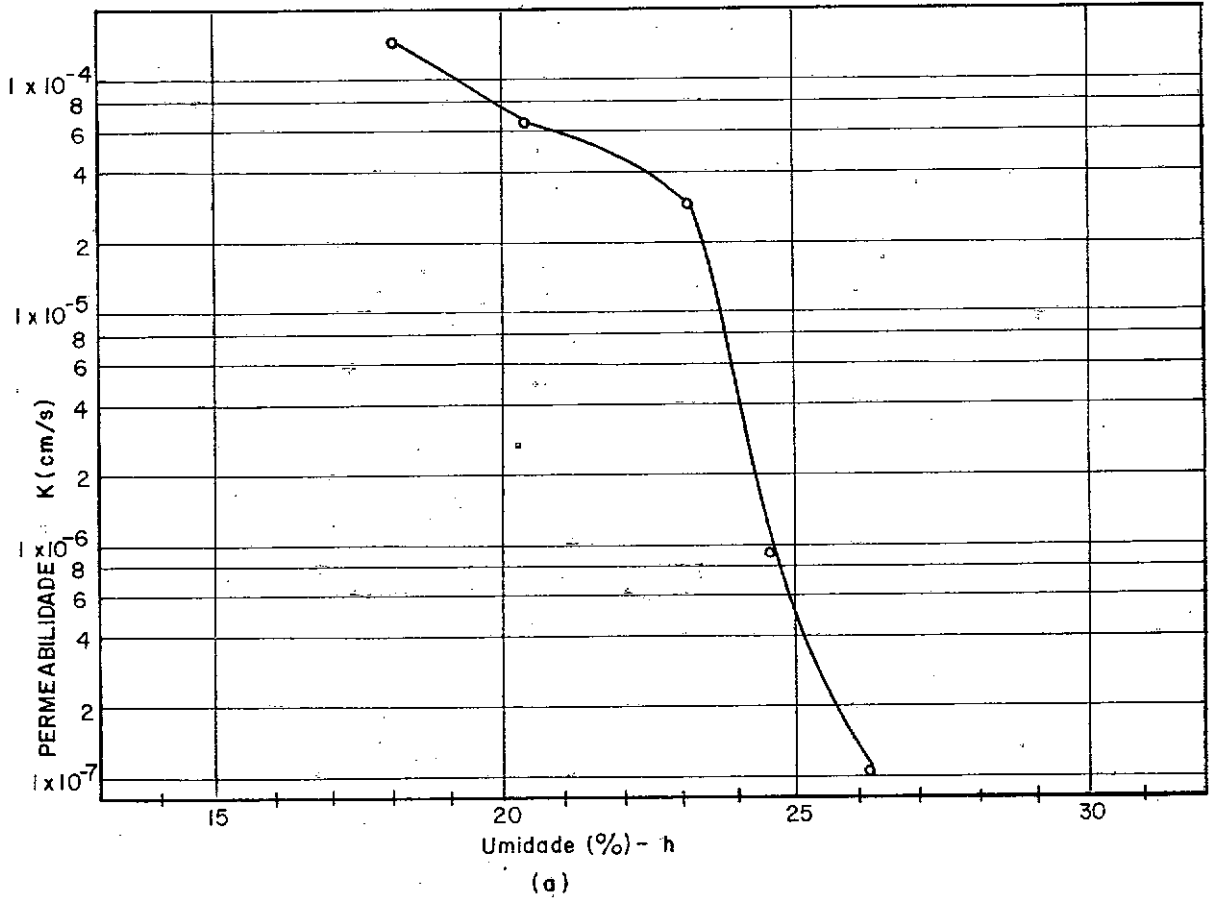


FIG. 26 - Amostras de solo com 3% de cal.

a) Permeabilidade (K) x Umidade (h)

b) Compactação por amassamento, 25 aplicações (17 kgf), 5 camadas.

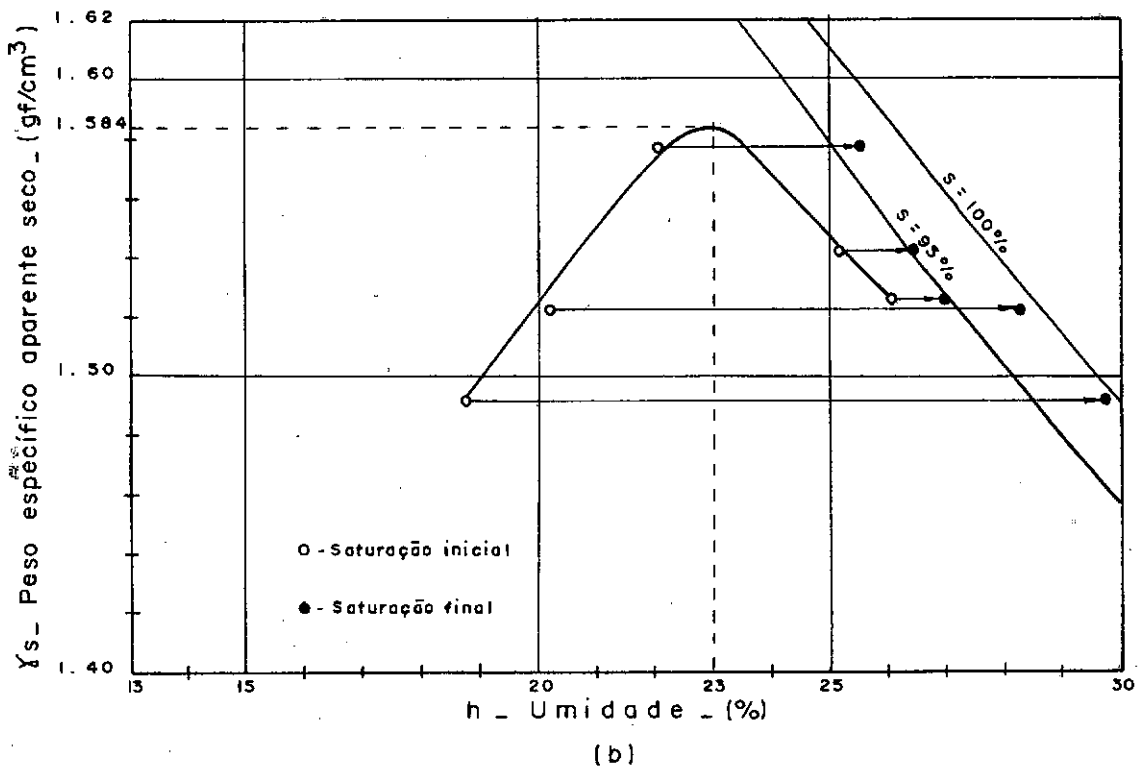
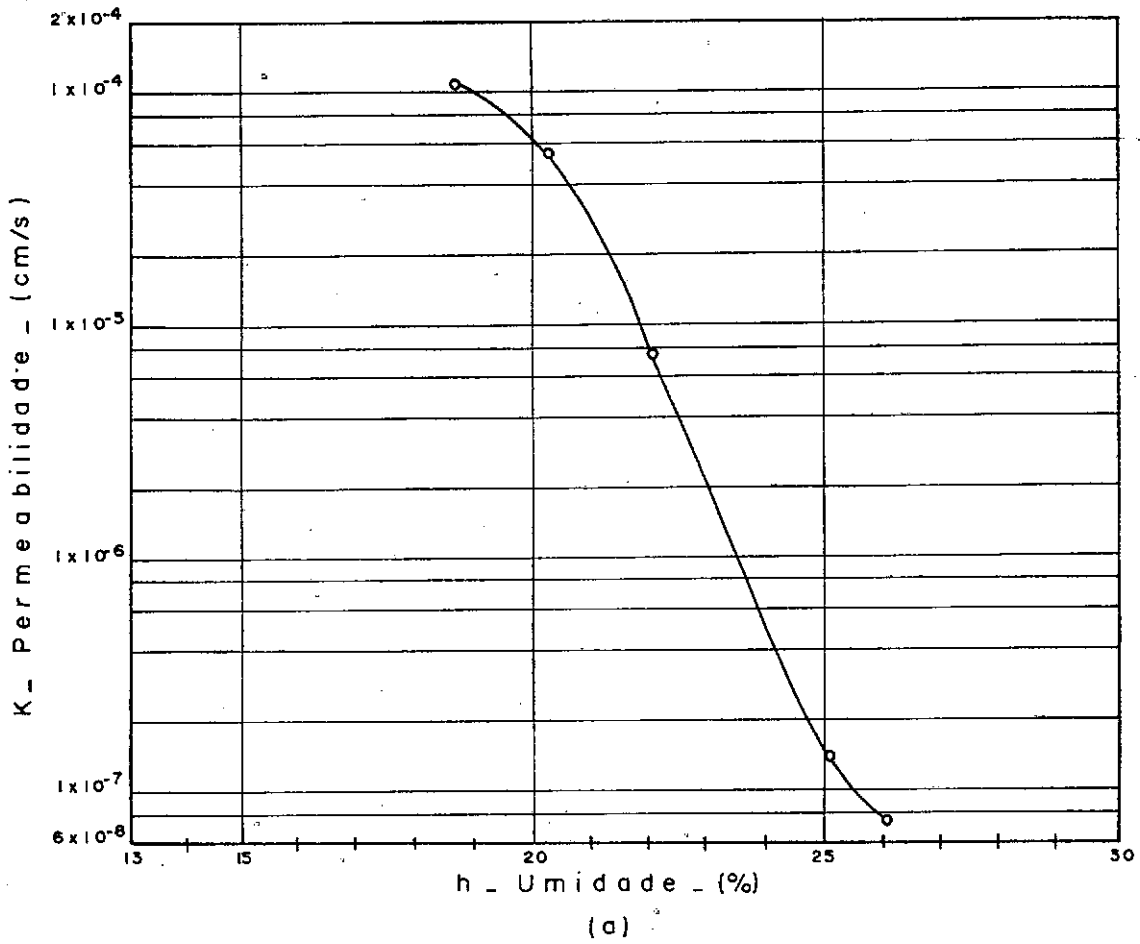


FIG. 27 - (a) - Permeabilidade (K) "versus" umidade (h) - (b) - Compactação por amassamento, 35 aplicações (17.kgf), 5 câmaras. Amostras de solo com 3% de cal.

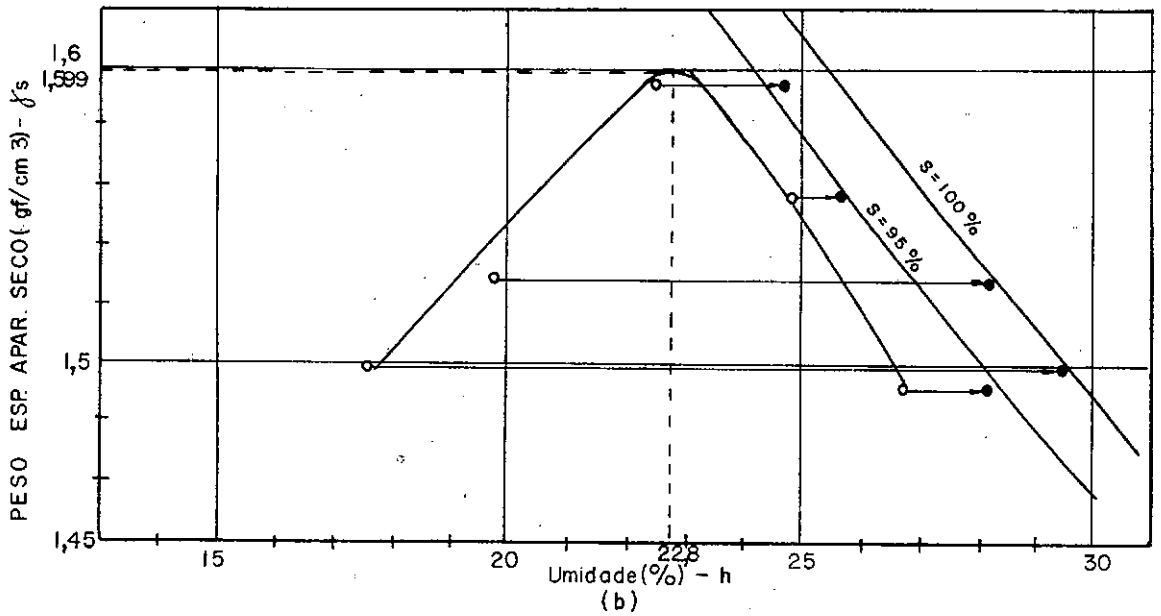
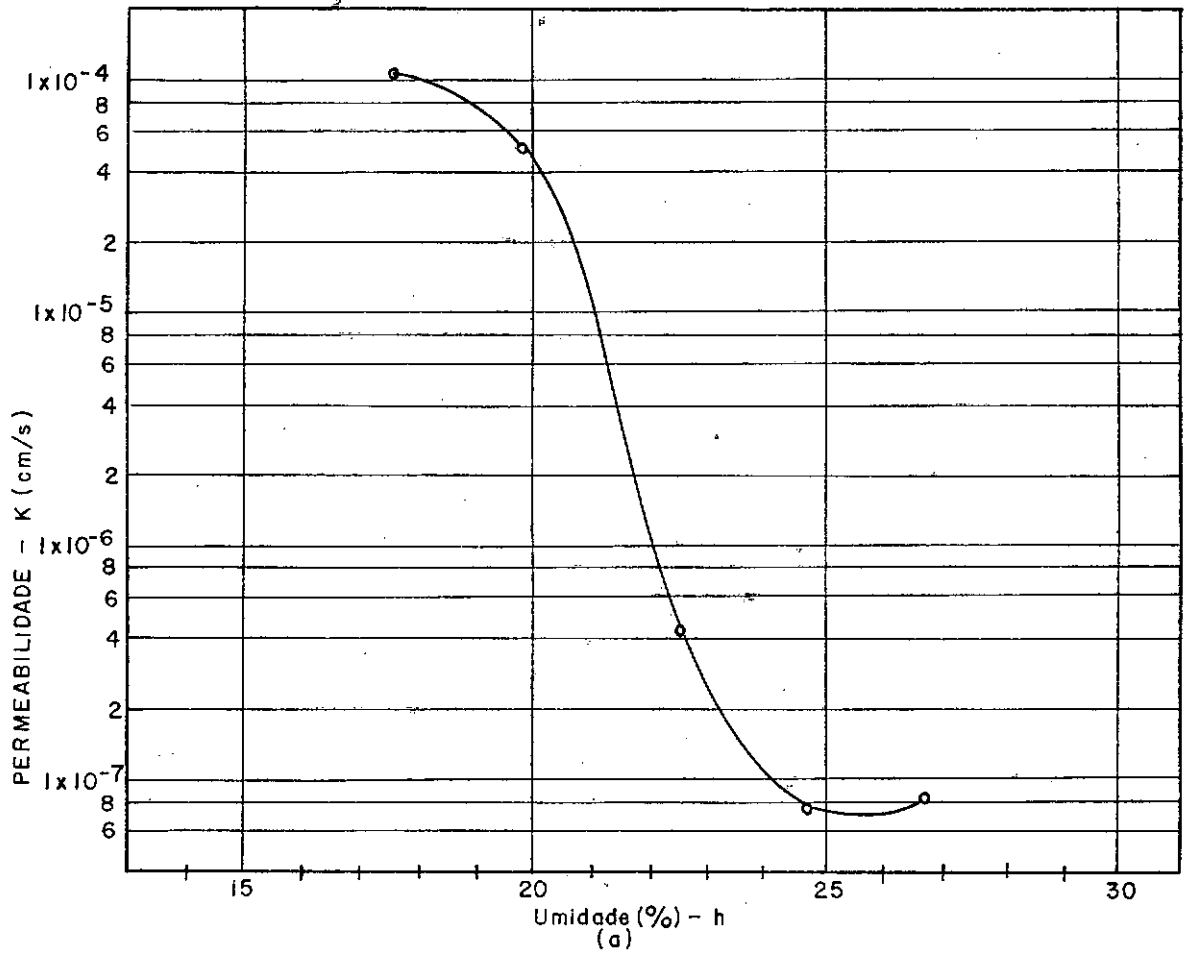


FIG. 28 - Amostras de solo com 3% de cal.

a) Permeabilidade (K) x Umidade (h).

b) Compactação por amassamento, 45 aplicações (17 Kgf), 5 camadas.

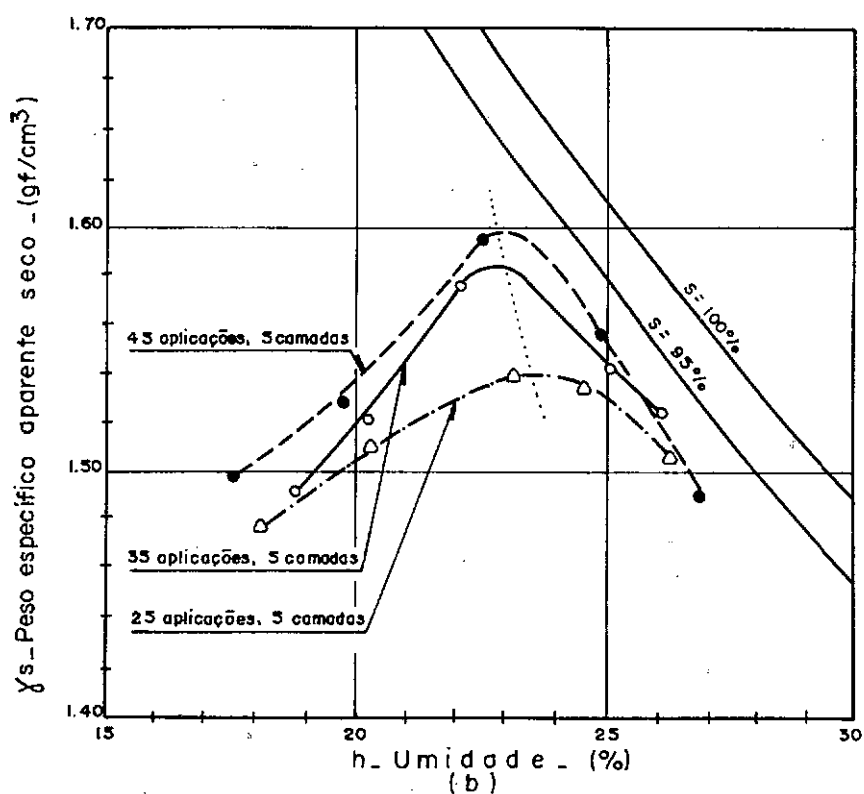
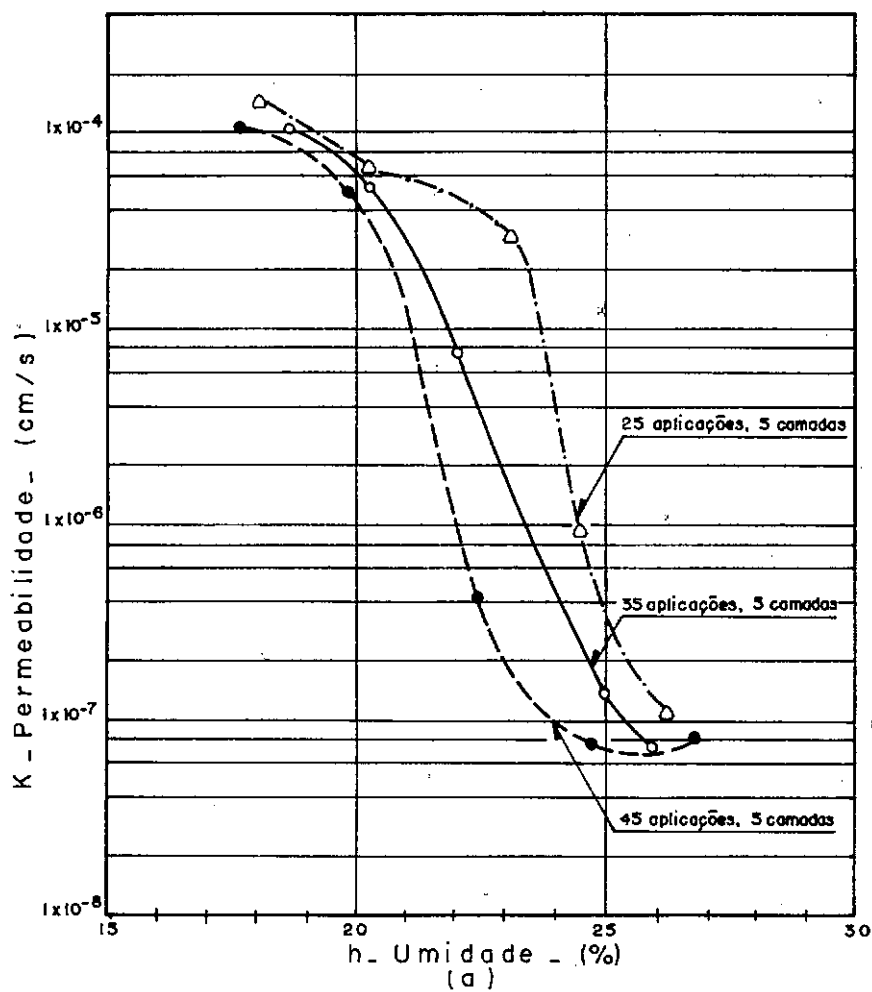


FIG.29-(a)-Permeabilidade (K) "versus" umidade (h) - (b)-Condições de compactação para três energias. Amostras de solo com 3% de cal.

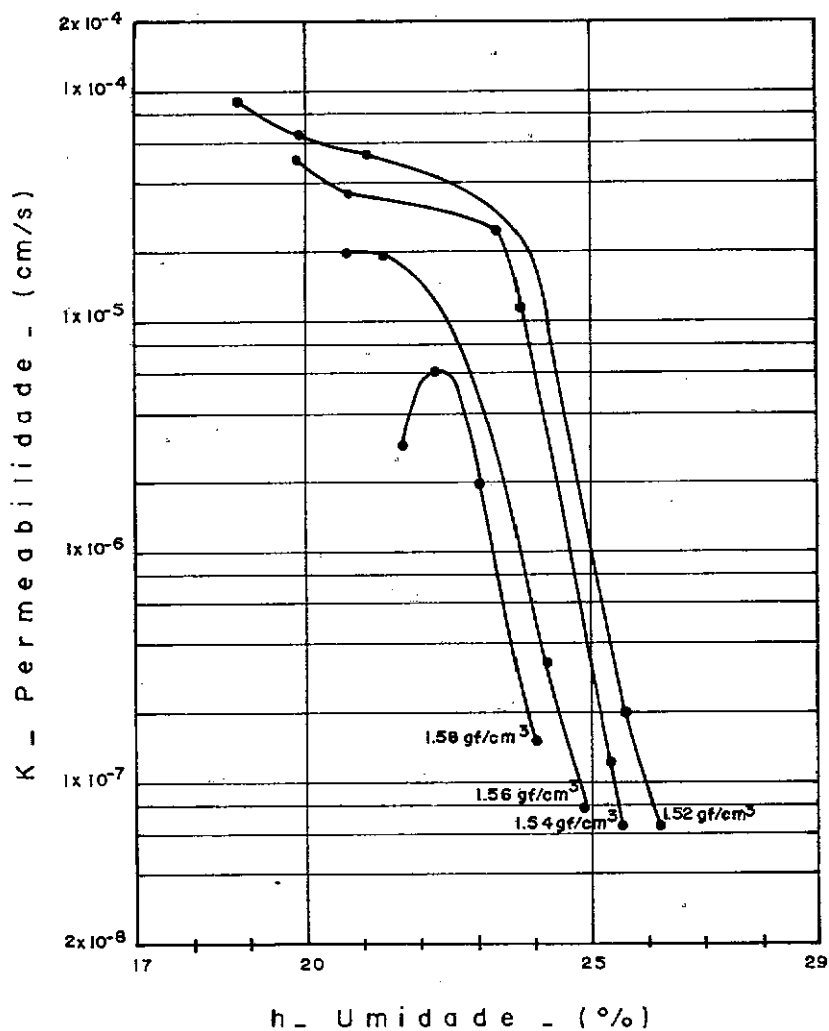


FIG.30 - Permeabilidade (K) "versus" umidade (h) para diversos pesos específicos aparentes secos de amostras de solo com 3% de cal.

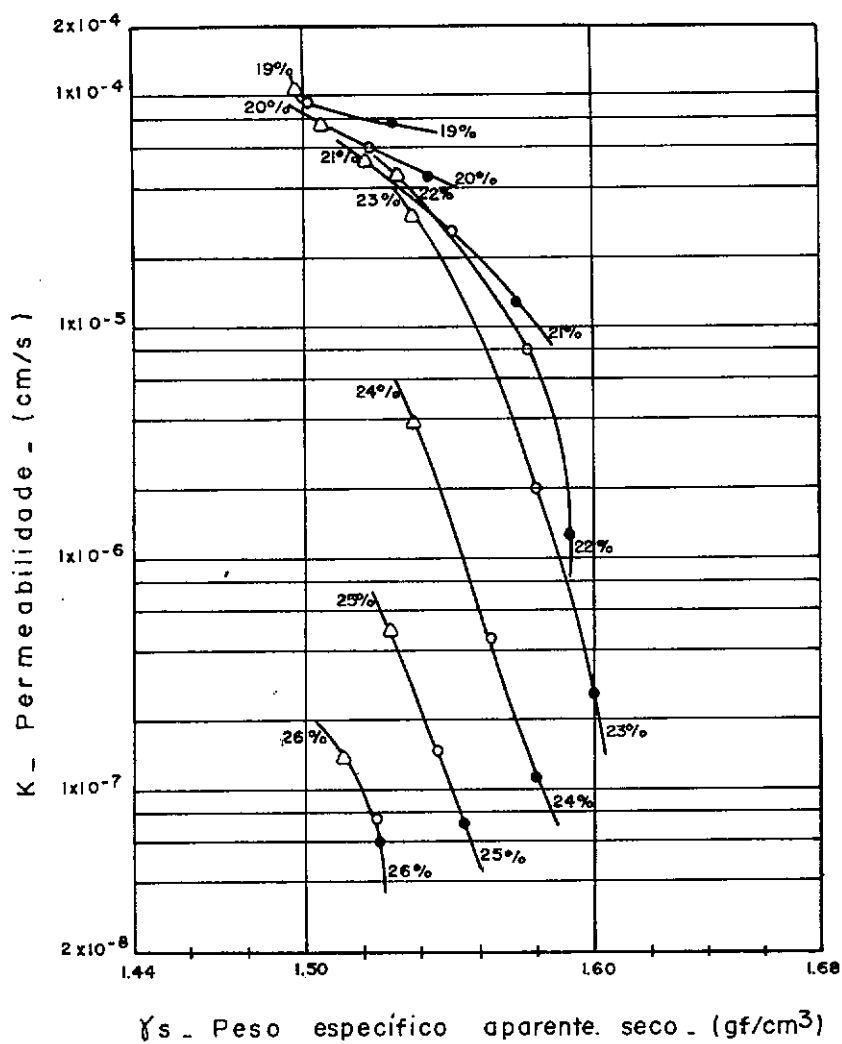


FIG.31 - Permeabilidade (K) "versus" peso específico aparente seco (γ_s) para diversas umidades de moldagem de amostras de solo com 3% de cal.

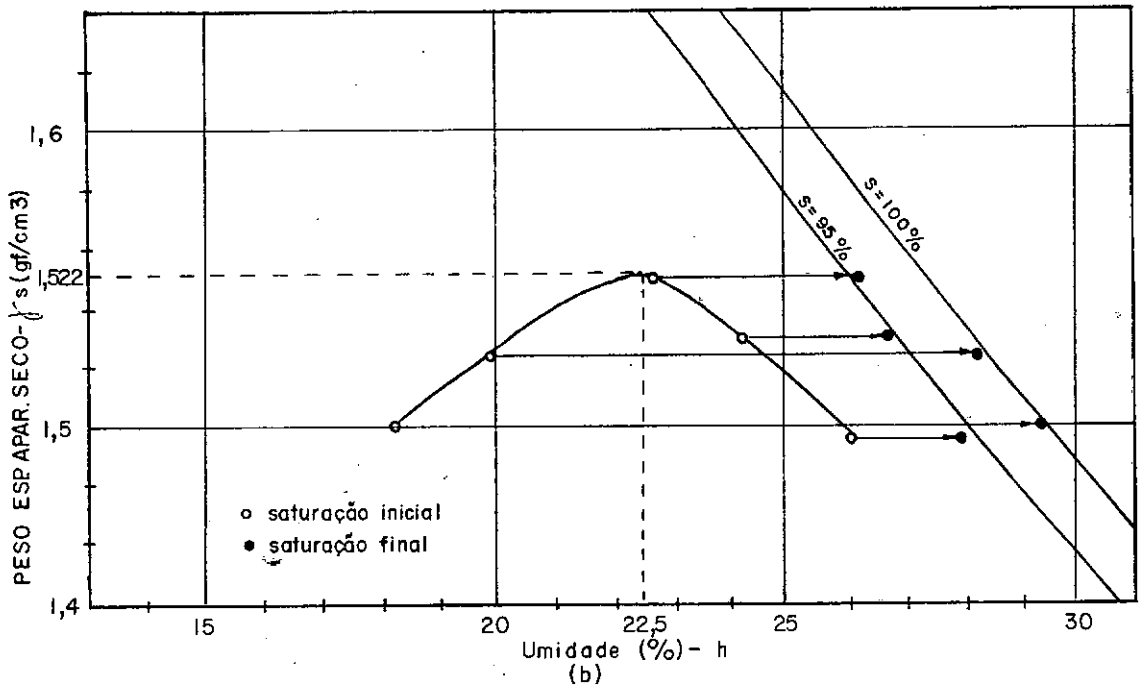
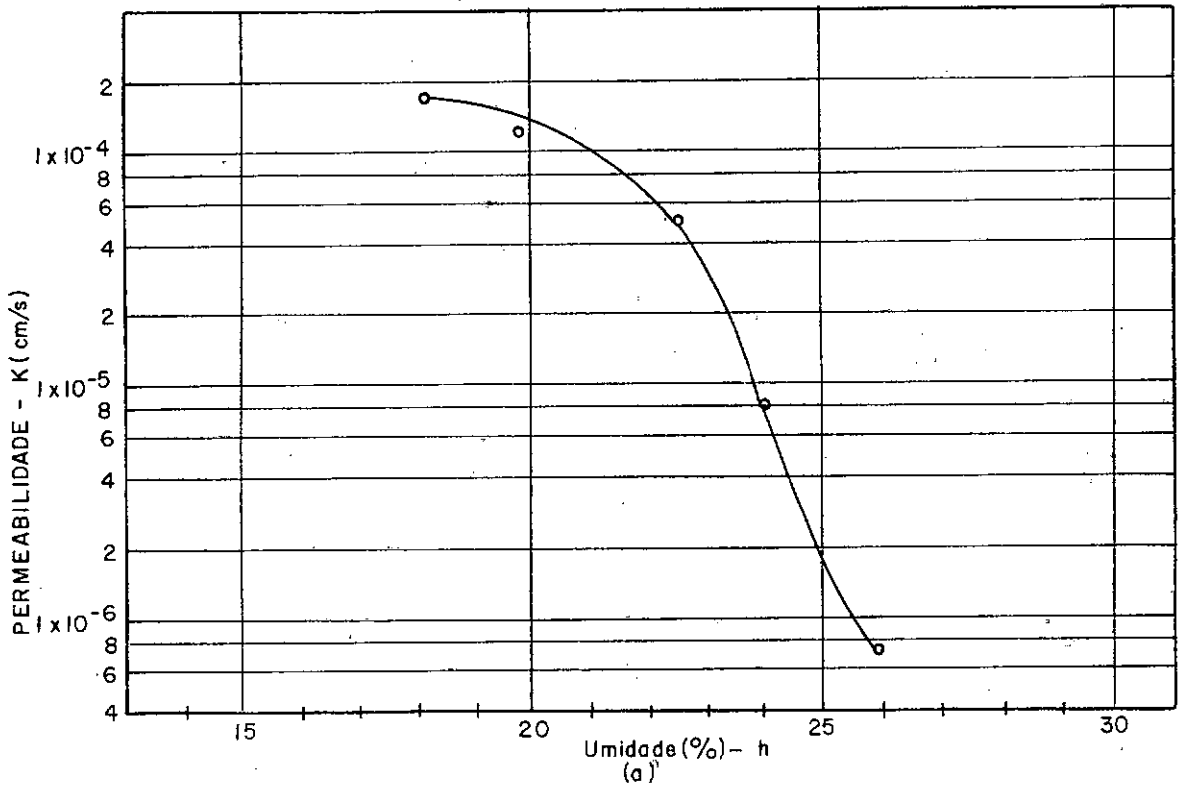


FIG. 32 - Amostras de solo com 3% de cal e 7 dias de cura após compactação.

a) Permeabilidade(K) x Umidade(h)

b) Compactação por amassamento, 25 aplicações(17 Kgf), 5 camadas.

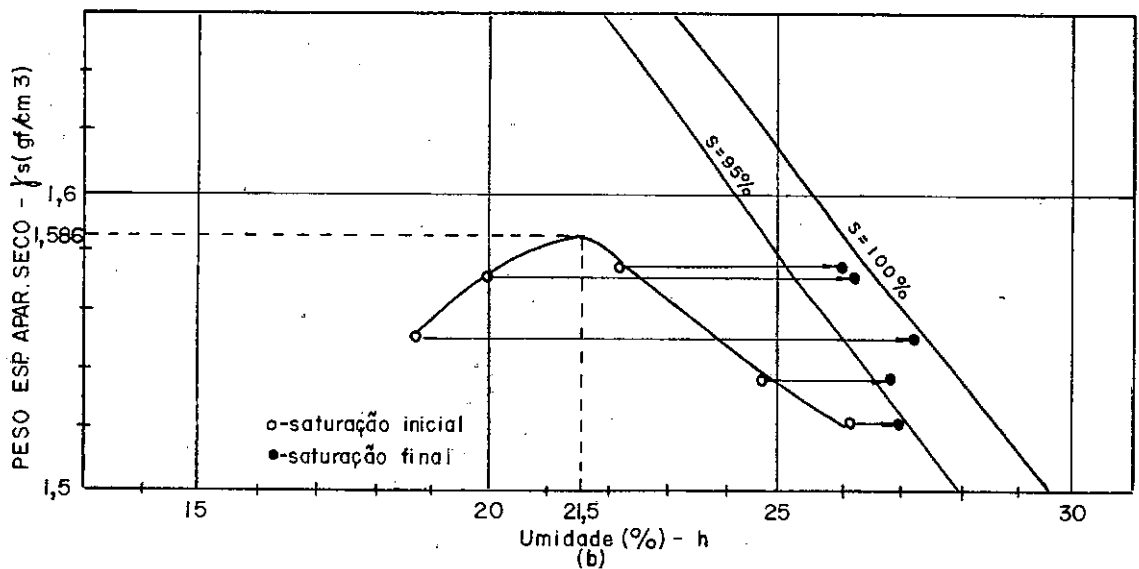
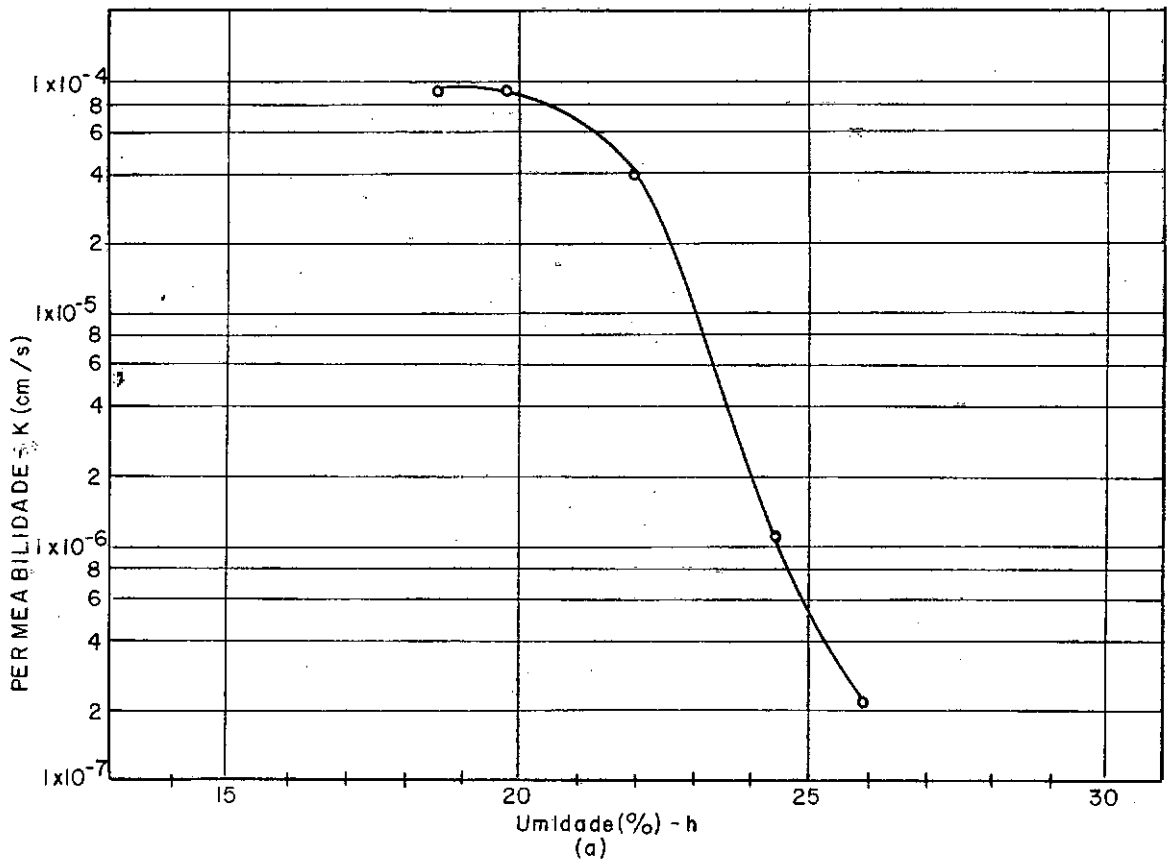


FIG. 33 - Amostras de solo com 3% de cal e 7 dias de cura após compactação.
a) Permeabilidade (K) x Umidade (h)
b) Compactação por amassamento, 35 aplicações (17 Kgf), 5 camadas.

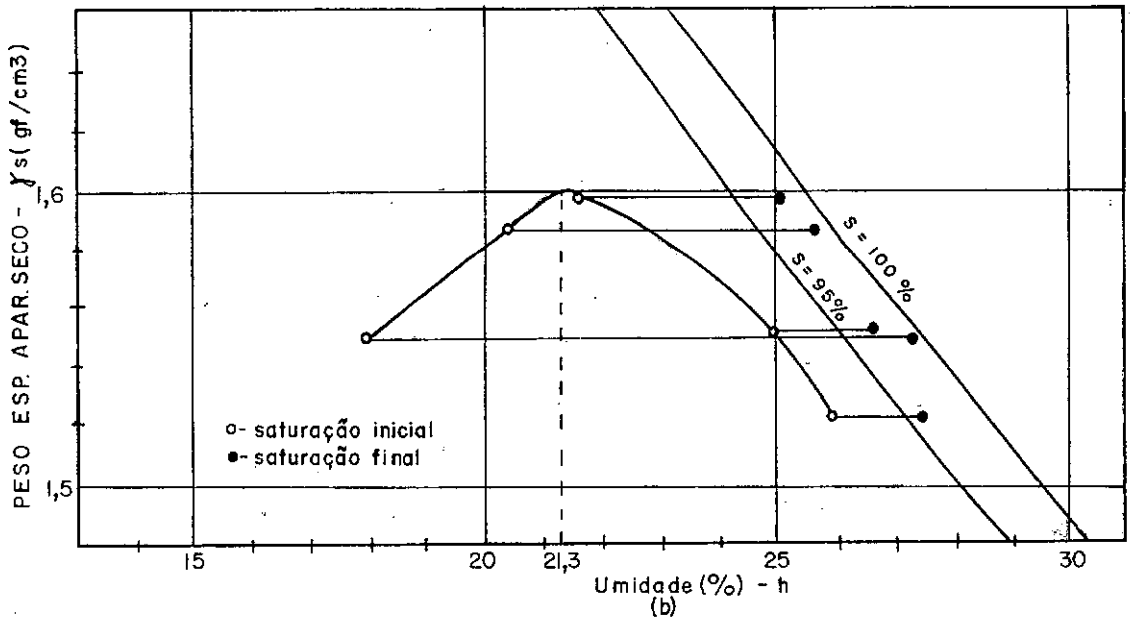
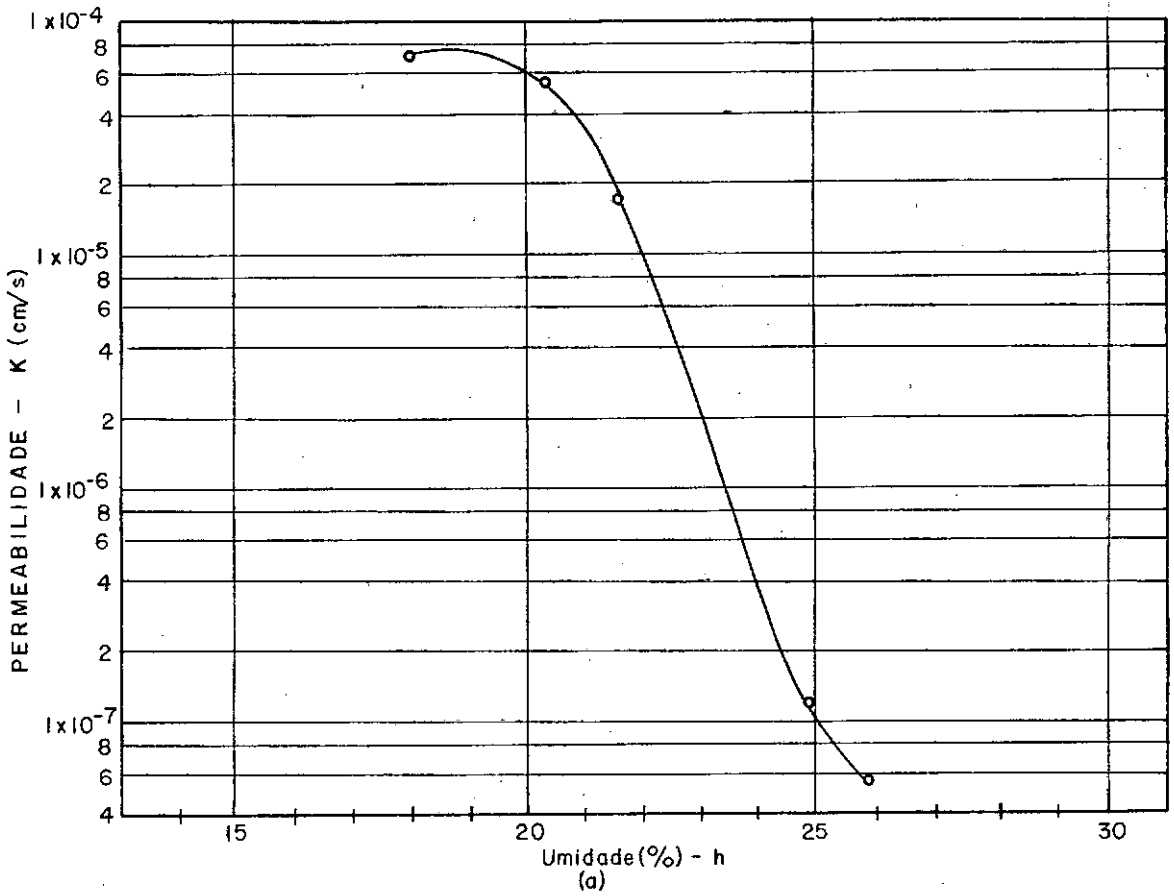


FIG. 34 - Amostras de solo com 3% de cal e 7 dias de cura após compactação.

a) Permeabilidade (K) x Umidade (h).

b) Compactação por amassamento, 35 aplicações (17 Kgf), 5 camadas.

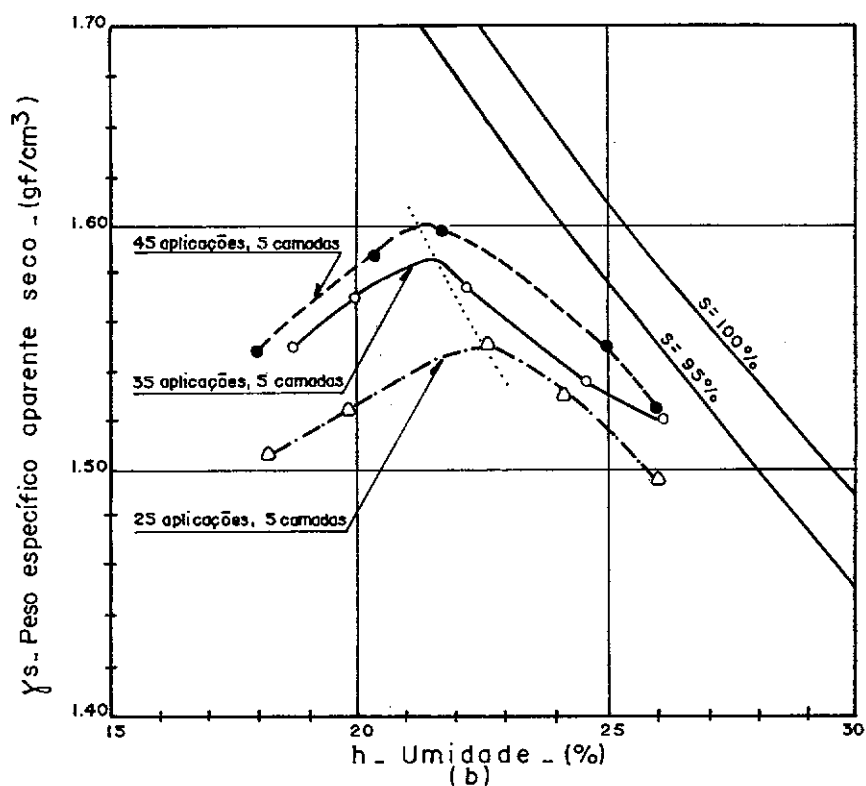
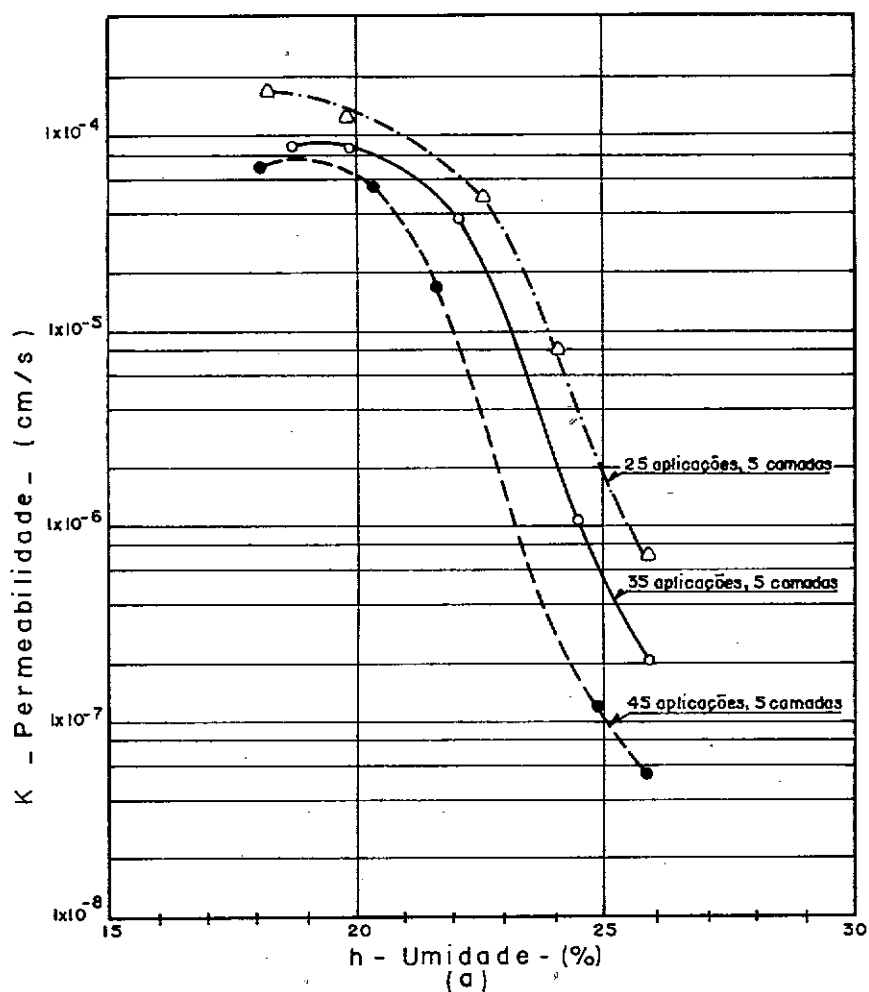


FIG.35. (a) - Permeabilidade (K) "versus" umidade (h) - (b) - Condições de compactação para três energias. Amostras de solo com 3% de cal e 7 dias de cura.

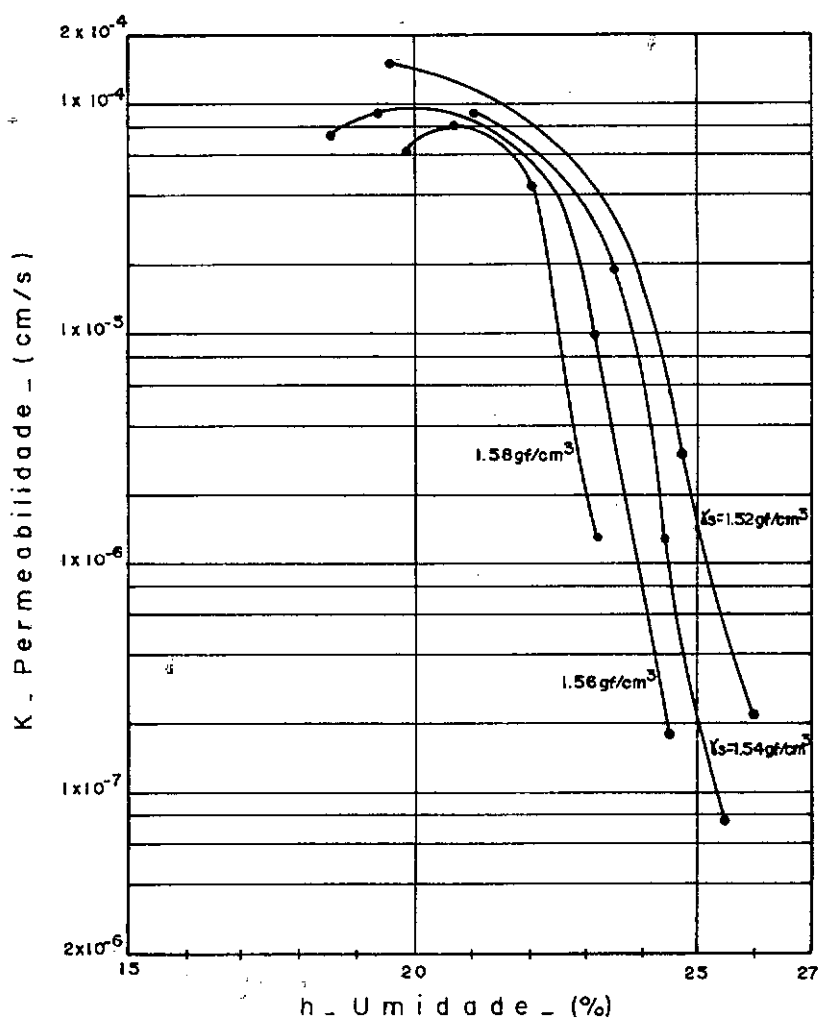


FIG.36 - Permeabilidade (K) "versus" umidade (h) para diversos pesos específicos aparentes secos de amostras de solo com 3% de cal e 7 dias de cura após a compactação.

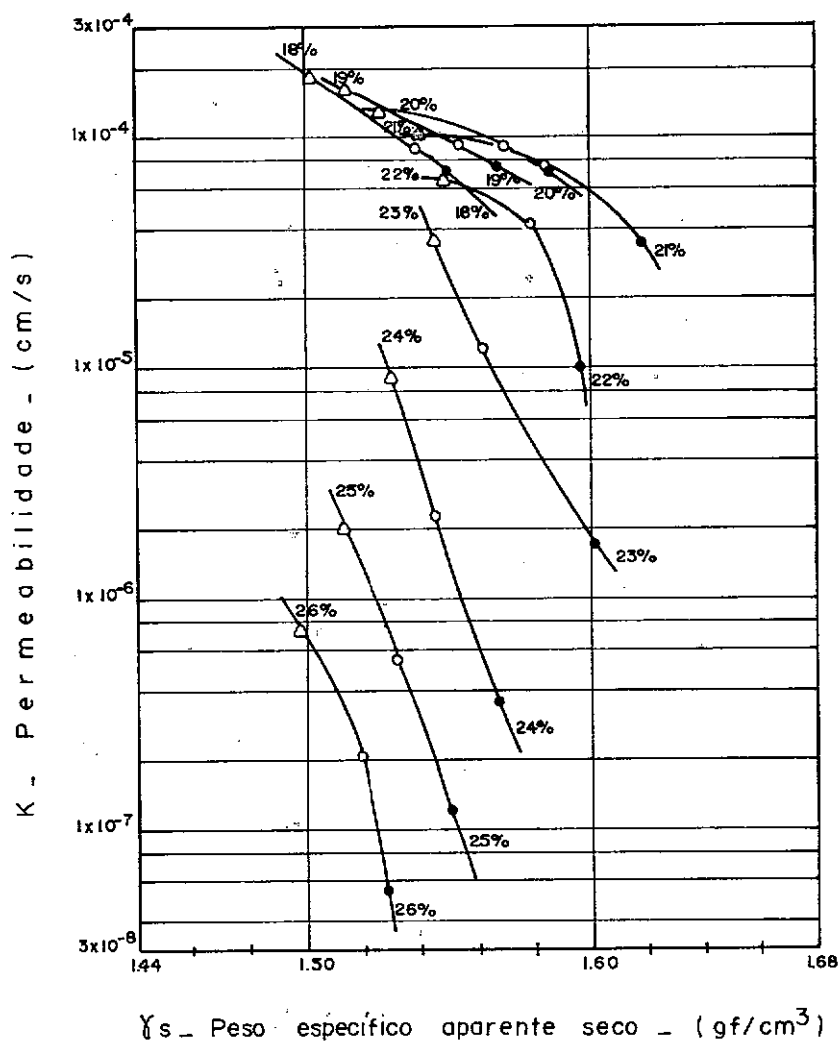


FIG. 37 - Permeabilidade (K) "versus" peso específico aparente seco (γ_s) para diversas umidades de moldagem de amostras de solo com 3% de cal e 7 dias de cura após a compactação.

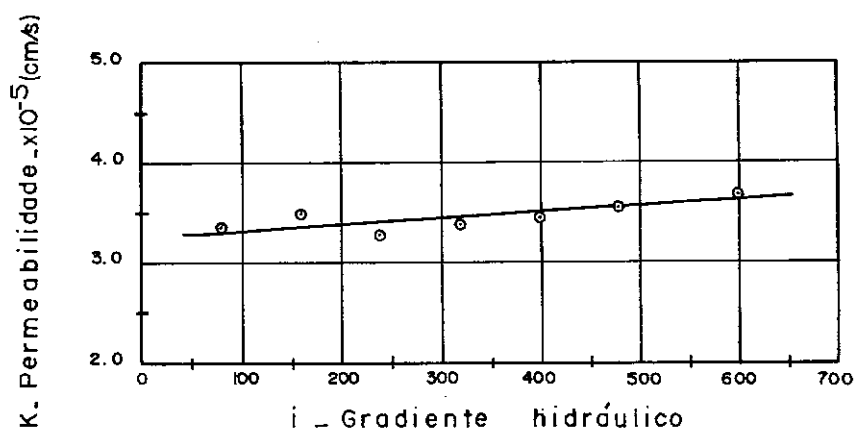


FIG. 38 — Permeabilidade (K) "versus" gradiente hidráulico (i).

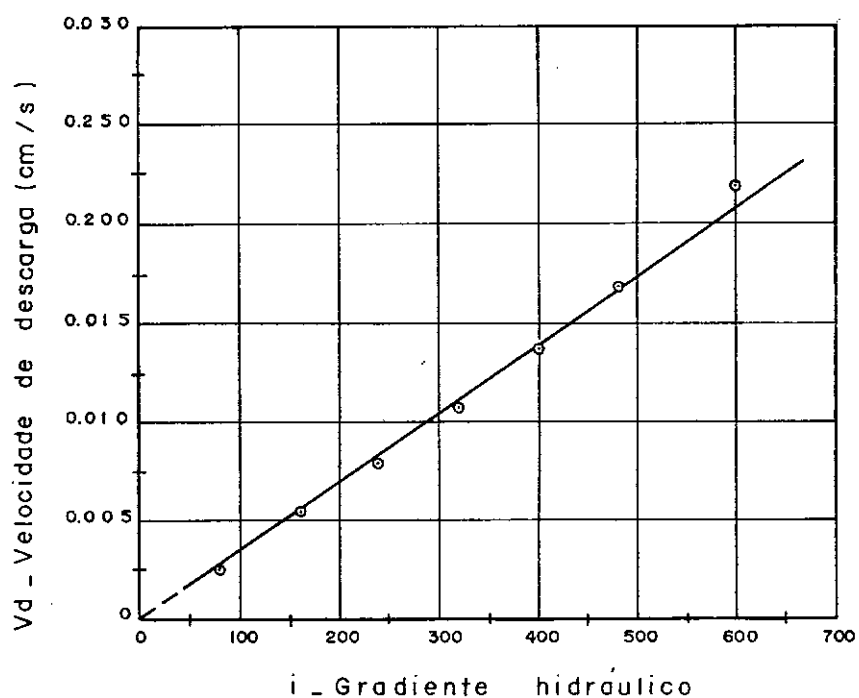


FIG. 39 — Velocidade de descarga (Vd) "versus" gradiente hidráulico (i).

FIG. 40 - CÉLULA DE PERMEABILIDADE

— para amostras indeformadas —

8

